



**Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt**



**HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN**

Entwicklung einer Co-Simulationsumgebung für einen Schienenfahrzeug- Fahrwerksprüfstand mit Sensorsimulation

Development of a co-simulation
environment for a rail vehicle bogie test
bench with sensor simulation

Michael Blazevic

Masterarbeit

In der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Hochschule München zur Erlangung des akademischen
Grades Master of Science

Eingereicht am:
30.09.2020

Prüfer:
Prof. Dr.-Ing. Simon Hecker

Betreuer:
Dr.-Ing. Daniel Lüdicke

Laufende Nr.:
641

Kurzfassung

In dieser Masterarbeit mit dem Titel: „Entwicklung einer Co-Simulationsumgebung für einen Schienenfahrzeug-Fahrwerksprüfstand mit Sensorsimulation“ wird eine Co-Simulationsumgebung eines Fahrwerk-Integrationsprüfstands für ein Hochgeschwindigkeitsschienenfahrzeug entwickelt. Dies geschieht im Rahmen der Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk (NGT-FuN) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Die Simulationsumgebung umfasst Mechanik, Automatisierungstechnik, Signalverarbeitung und Sensorik des Prüfstandes. Sie wird für die Softwareentwicklung der Automatisierungstechnik und des Echtzeitsystems vor Verfügbarkeit des realen Prüfstandes genutzt. Die dreidimensionale Prüfstandsmechanik bildet die Mehrkörpersimulation in Simpack ab. Die signalbasierten Modelle sind in Matlab/Simulink modelliert. Die Signalverarbeitung umfasst die Datenübertragung und die Automatisierungstechnik, welche eine Lateralregelung (Spurführung) enthält.

Zudem wird eine Messtechnik- und Sensorschnittstelle eingebaut. Sie beinhaltet Modelle der Sensortechnologien, die auch im realen System Verwendung finden. Aufgabe dieser Sensormodelle ist es, ideale physikalische Signale der Mehrkörpersimulation in reale technische Signale mit Störungen und Fehlern umzuwandeln. Die Simulation berücksichtigt somit das dynamische Verhalten der Sensoren und mögliche Fehlerszenarien sind simulierbar. Modelle für Winkel-, Kraft-, Moment- und Abstandssensoren werden erstellt. Ziel ist es anhand der Co-Simulation und der Sensorschnittstelle Simulationsexperimente mit realitätsnahen Sensorsignalen durchführen zu können. Die Sensormodelle bilden mittels Parameter aus Datenplätzen die Sensoren ab, welche im realen Prüfstand Verwendung finden. Mit der entwickelten Simulationsumgebung und den Sensormodellen werden realistische Simulationsszenarien verwendet, um die implementierten physikalischen und technischen Stör- und Fehlerphänomene der Sensoren zu verifizieren. Vergleiche der Regelgüte des Lateralreglers unter Verwendung realistischer und idealer Sensorsignale als Eingänge für den Regler, veranschaulichen abschließend die Wirkung der Sensorsimulation auf die Spurführung.

Abstract

In this master's thesis with the title: “Development of a co-simulation environment for a rail vehicle bogie test bench with sensor simulation”, a co-simulation environment for a bogie test bench for a high-speed rail vehicle is developed. This is done within the framework of the NGT-FuN research infrastructure of the German Aerospace Center. The simulation environment includes mechanics, automation technology, signal processing and sensor technology of the test bench. It is used for the software development of the automation technology and the real-time system before the real test bench is available. The multi-body simulation in Simpack represents the three-dimensional test bench mechanics. The signal-based models are created in Matlab / Simulink. The signal processing includes the data transmission and the automation technology, which contains a lateral control (track guidance).

Besides, a sensor/measurement technology interface is built in. It contains models of the sensor technologies that are used in the real system. The function of these models is to convert ideal physical signals of the multibody simulation into real technical signals with disturbances and errors. The co-simulation considers the dynamic behavior of the sensors and possible error scenarios can be simulated. Models for angle, distance force and moment sensors are created. The goal is to be able to carry out simulations with realistic sensor signals based on the co-simulation and the sensor interface.

The sensor models represent the sensors that are used in the real test bench with real parameters from data sheets. With the developed simulation environment and the sensor models, realistic simulation scenarios are used to verify the implemented physical and technical disturbance and error phenomena of the sensors. Finally, comparisons of the control quality of the lateral controller using realistic and ideal sensor signals as inputs for the controller illustrate the effect of the sensor simulation on the tracking guidance.

Danksagung

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Masteranden-Tätigkeit beim deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Standort Oberpfaffenhofen und war nur durch die umfangreiche Unterstützung und Hilfe einiger Personen möglich, weshalb ich mich an dieser Stelle bei allen bedanken möchte.

Herzlich bedanken möchte ich mich bei Dr.-Ing. Daniel Lüdicke für die umfangreiche Betreuung. Seine hilfreichen Anregungen unterstützten mich über die gesamte Laufzeit meiner Tätigkeit im Institut.

Zudem gilt mein Dank auch Herrn Dr.-Ing. Andreas Heckmann und Herrn Björn Goetjes, die mich mit hilfreichen und inspirierenden Tipps und Ideen berieten.

Besonderer Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Simon Hecker, der mich seitens der Hochschule durch seine engagierte Betreuung und sein persönliches Engagement zur Seite stand.

Anschließend möchte ich allen Personen aus meinem persönlichen Umfeld, die mich während des gesamten Studiums direkt oder indirekt unterstütz haben, danken.

Michael Blazevic

Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit einschließlich aller beigefügter Materialien selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Werken entnommen sind, wurden in jedem Einzelfall unter Angabe der Quelle deutlich als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Prüfungsarbeit eingereicht worden.



Michael Blazevic

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Ziel und Zweck der Arbeit	2
1.3	Zeit- und Aufgabenplanung	2
1.4	Aufbau der Arbeit	3
2	Stand der Technik	4
2.1	Schienenfahrzeuge heute	4
2.2	Das DLR	6
2.3	Projekt „Next Generation Train“	7
2.4	Schienenfahrzeugtechnik	9
2.4.1	Schienenfahrzeuge als Verkehrsmittel	9
2.4.2	Grundlagen	10
2.4.3	Fahrwerksdynamik	10
2.4.4	Schlupf zwischen Rad und Schiene	12
2.5	Das NGT Fahrwerkskonzept	12
2.5.1	Das NGT-HST Fahrwerk	12
2.5.2	Fahrwerksprüfstand	14
2.6	Messtechnik und Sensoren im NGT FuN Integrationsprüfstand	15
2.6.1	Grundlagen Sensorik	16
2.6.2	Winkel/Drehzahlsensorik	18
2.6.3	Distanzsensorik mit LVDT-Sensoren	19
2.6.4	Distanzsensorik mit Lasersensoren	21
2.6.5	Kraft- und Momentsensorik	23
2.7	Modelbildung und Simulation	25
2.7.1	Grundlagen	25
2.7.2	Signalorientierte Modelliersprache	26
2.7.3	(Physikalisch) objektorientierte Modelliersprache	27
2.7.4	Mehrkörpersimulation (MKS)	27
2.7.5	Co-Simulation	27
2.8	Das V-Modell	28
3	Entwicklung einer Co-Simulationsumgebung für den NGT-FuN Integrationsprüfstand	29
3.1	Anwendung des V-Modells	29
3.2	Erstellung der Co-Simulationsarchitektur	30
3.2.1	NGT FuN Mehrkörpersimulationsmodell	32
3.2.2	Sensorik-Schnittstelle	33

3.3	Sensorpositionen im NGT-FuN	33
3.3.1	Winkel/Drehzahlsensor	34
3.3.2	Distanzsensoren	34
3.3.3	Kraft- und Momentsensoren	36
3.4	Anforderungen an die Sensorschnittstelle	37
3.5	Generische Modellstruktur für die Sensorsimulation	38
3.6	Sensormodell: Winkel- und Drehzahl-Sensorik	40
3.6.1	Sensor-Physikmodell	41
3.6.2	Physik-Störmodell	41
3.6.3	Physik-Fehlermodell	44
3.6.4	Sensor-Technikmodell	44
3.6.5	Technik-Störmodell	45
3.6.6	Technik-Fehlermodell	50
3.7	Sensormodell: LVDT-Distanzsensorik	51
3.7.1	Sensor-Physikmodell	53
3.7.2	Physik-Störmodell	53
3.7.3	Physik-Fehlermodell	56
3.7.4	Technikmodell	56
3.7.5	Sensor-Technikmodell	57
3.7.6	Sensor-Störmodell	58
3.7.7	Sensor-Fehlermodell	59
3.7.8	Auswertung-Technikmodell	59
3.7.9	Auswertung-Störmodell	61
3.7.10	Auswertung-Fehlermodell	62
3.7.11	Digitalisierung-Technikmodell	62
3.7.12	Digitalisierung-Störmodell	62
3.7.13	Digitalisierung-Fehlermodell	63
3.8	Sensormodell: Laser-Distanzsensorik (Triangulation)	63
3.8.1	Sensor-Physikmodell	64
3.8.2	Physik-Störmodell	64
3.8.3	Physik-Fehlermodell	64
3.8.4	Sensor-Technikmodell	65
3.8.5	Technik-Störmodell	65
3.8.6	Technik-Fehlermodell	65
3.8.7	Digitalisierung-Technikmodell	65
3.9	Sensormodell: Kraft- und Momentsensorik (DMS)	66

3.9.1	Sensor-Physikmodell	67
3.9.2	Physik-Störmodell	67
3.9.3	Physik-Fehlermodell	72
3.9.4	Sensor-Technikmodell	72
3.9.5	Technik-Störmodell	73
3.9.6	Technik-Fehlermodell	73
3.9.7	Digitalisierung-Technikmodell	73
3.10	Integration der Sensormodelle in die Co-Simulation	74
3.10.1	Anlegen von Ausgangssignale in Simpack für die Simat-Schnittstelle	74
3.10.2	Problem des Nichtvorhandenseins einiger Sensorpositionen im Simpack-Modell ...	75
3.10.3	Problem der Eliminierung einiger Variablen/Zustände	77
3.11	Der Lateralregler im NGT FuN (Spurführung)	78
4	Test der Co-Simulationsumgebung mit Sensorsimulation anhand realistischer Simulationsszenarien	81
4.1	Aufbau der Co-Simulationsumgebung	81
4.2	Simulationsszenarien	84
4.2.1	Gesamtprüfstand vom NGT-FuN bei lateraler Sprungantwort	84
4.2.2	Encodermodell mit konstantem Geschwindigkeitssignal von 400 km/h als Eingang	87
4.3	Sensorsimulationen	88
4.3.1	Winkel/Drehzahlmessung mit Encoder-Modell	88
4.3.2	Distanzmessung mit LVDT-Sensormodell	92
4.3.3	Kraftmessung mit Kraft-Sensormodell	99
4.4	Untersuchung der Auflösung des Encoders bei verschiedenen Clock-Frequenzen	103
4.5	Anwendung der Co-Simulationsumgebung mit Sensorsimulation	105
4.5.1	Test der Lateralregelung bei idealen und realen Sensorsignalen	105
4.5.2	Test der Lateralregelung bei dynamikverändernden Störungen im LVDT-Sensor ...	107
4.5.3	Test der Lateralregelung bei verschiedenen Fehlerszenarien	108
4.6	Zusammenfassung und Bewertung der Tests	110
5	Zusammenfassung und Ausblick	111
5.1	Zusammenfassung	111
5.2	Ausblick	112
6	Referenzen	113
6.1	Literatur	113
6.2	Abbildungsverzeichnis	115
6.3	Tabellenverzeichnis	118
6.4	Formelverzeichnis	118
7	Anhang	121

1 Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Thematik ein. Zudem werden sowohl die Ziele und der Zweck als auch der Aufbau dieser Arbeit beschrieben.

Diese Masterarbeit entsteht im Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik (SR) im Robotik-Mechatronik-Zentrum (RMC) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) am Standort Oberpfaffenhofen bei München. Im Rahmen des Projektes „Next Generation Train“ kurz NGT wird (unter Anderem) ein mechatronisches Hochgeschwindigkeitsfahrwerk entwickelt. Die DLR-Großinvestition NGT-FuN baut von 2019-2021 ein Fahrwerk im Realmaßstab mit einem Integrationsprüfstand auf.

Das Fahrwerk bildet das Bindeglied zwischen den Gleisen und dem Wagenkasten und ist somit eine der wichtigsten Elemente eines Schienenfahrzeugs. An diesem sind die Räder angebracht. Bei den meisten Fahrwerken sind gegenüberliegende Räder mit Wellen verbunden, sodass sie sich nicht unabhängig voneinander drehen können. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Fahrwerk betrachtet, bei welchem die gegenüberliegenden Räder einzeln gelagert und somit winkelunabhängig sind. Dieser Fahrwerkstyp heißt Einzelradfahrwerk. Vorteile dieses Aufbaus ist eine Verringerung des Verschleißes am Rad und an der Schiene. (technische Details in Kapitel 2.4.3)

Für dieses Fahrwerk soll ein Prototyp mit Integrationsprüfstand, im Maßstab 1:1, aufgebaut werden. Dies geschieht im Rahmen der NGT-FuN (Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk).

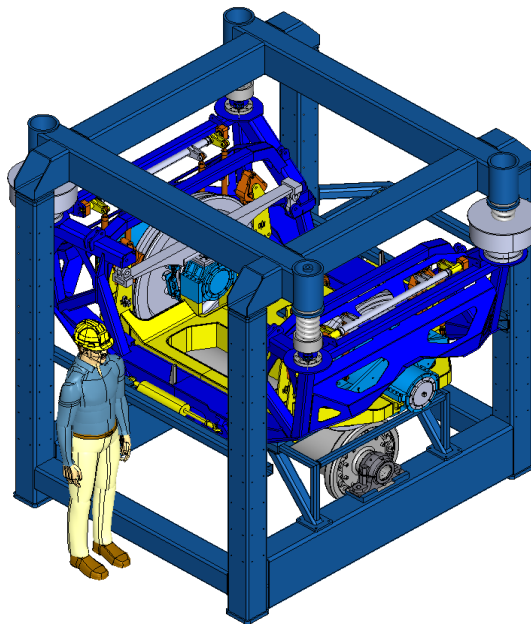


Abbildung 1 NGT-FuN Integrationsprüfstand (CAD-Zeichnung)

Abbildung 1 zeigt eine CAD-Konstruktionszeichnung vom NGT-FuN Integrationsprüfstand. Zu erkennen sind der Prüfstandsrahmen, das Fahrwerk im Inneren und die Rolle, welche die Gleise simuliert.

1.1 Problemstellung

Der physikalische Aufbau des NGT FuN Prüfstands wird erst voraussichtlich im Jahr 2021 fertiggestellt. Durch die späte Verfügbarkeit des mechanischen Prüfstands können keine realen Tests für die Softwareentwicklung für die RCP-Automatisierungssoftware vorgenommen werden. Auch

sämtliche Regel- und Steueralgorithmen, wie die Spurführungsregelung können noch nicht praktisch angewandt und feingetunt werden.

Abhilfe schafft eine modellbasierte Entwicklung. Vor der Verfügbarkeit des realen Prüfstandes und der dazugehörigen Automatisierungshardware soll bereits die Softwareentwicklung mit einer Simulationsumgebung, die den Prüfstand abbildet, beginnen.

Aktuell existieren eine Simpack-Mehrkörpersimulation (MKS) von der Mechanik des Systems und eine Vorversion der Automatisierungstechnik und Signalverarbeitung in Simulink. Weder die Mehrkörpersimulation noch die Automatisierungssoftware berücksichtigen jedoch die Eigenschaften der Messtechnik und Sensorik im NGT-FuN. Daher wird in dieser Arbeit eine zusätzliche Sensorsimulationsschnittstelle entwickelt. So kann das System mit realistischer Nachbildung der Sensorsignale im NGT-FuN simuliert werden.

1.2 Ziel und Zweck der Arbeit

Diese Arbeit entsteht im Rahmen des Projektes NGT-FuN (**F**orschungsinfrastruktur **NGT**-Fahrwerk). Kernziel des Projektes ist der Aufbau eines Fahrwerk-Prototyps des NGT-HST mit einem Integrationsprüfstand im Maßstab 1:1, um praktische Tests durchführen zu können. Zusätzlich zum physikalischen Aufbau des Prüfstands soll eine Simulationsumgebung als RCP-System (**R**apid-**C**ontrol-**P**rototyping) geschaffen werden um vorab Software, Sensoren und Regelalgorithmen testen zu können, bevor die Hardware fertiggestellt wird.

Für diesen Zweck entsteht in dieser Arbeit eine Simulationsumgebung. Diese ist eine Co-Simulation und kombiniert ein vorhandenes Mehrkörper-Simulationsmodell (kurz MKS) des Fahrwerksprüfstands aus Simpack mit einer Umgebung in Matlab/Simulink, welche die Automatisierungssoftware (Spurführung) und die Signalverarbeitung abdeckt. Hierbei wird das MKS in Simpack um Sensorausgänge erweitert. Für jeden Sensor im realen System wird ein Ausgang in Simpack erstellt, welcher ideale physikalische Messsignale ausgibt. Eine zusätzliche Software-Schnittstellenschicht hat die Aufgabe, die idealen physikalischen Ausgangssignale der Mehrkörpersimulation in realitätsnahe technische Sensorsignale umzuwandeln, wie das RCP-System die Sensorsignale auch später von den Messverstärkern einliest. Dabei sollen die dynamischen Eigenschaften, Störungen und mögliche Fehler von Winkel-Sensoren (Encoder), Distanzsensoren (LVDT- und Laser-Abstandssensoren) und Kraft- und Momentsensoren (DMS-Technologie) mit in die Simulationsumgebung eingebracht werden. Damit ist in einer offline-Software-in-the-loop Simulation eine realitätsnahe Softwareentwicklung möglich. Anhand der Mehrkörpersimulation, der Spurführungsregelung und den entwickelten Sensormodellen leiten sich Anwendungsszenarien ab, die die Leistungsfähigkeit und den Funktionsumfang der Simulationsumgebung darstellen. Simulationsexperimente mit der erstellten Co-Simulation und Parameter aus Datenblättern von realen Sensoren sollen die Auswirkungen der Störungen und Fehler der Sensoren im NGT-Fahrwerk veranschaulichen. Daraus werden Erkenntnisse gewonnen, welche Sensoreigenschaften für das Gesamtsystem mehr und weniger relevant sind. Diese Informationen sind für eine finale Auslegung der Messtechnik und Sensorik hilfreich.

1.3 Zeit- und Aufgabenplanung

Für die vorliegende Masterarbeit ist ein Bearbeitungszeitraum von 6 Monaten vorgesehen. Die Erstellung ist in fünf Abschnitten aufgeteilt, welche etwa ein bis zwei Monate in Anspruch nehmen:

- Einarbeitung in die Thematik und Festlegung der Ziele
- Erstellung der Sensormodelle
- Aufbau der Co-Simulation
- Zusammenfassendes Simulationsszenario und Verifizierung der Modelle

- Dokumentation und Fertigstellung der Masterarbeit

Die Fertigstellung eines jeden Abschnittes wird als Meilenstein markiert. Diese Abschnitte sind wiederum in kleine Arbeitspakete von ein bis sechs Wochen aufgeteilt. Im Anhang II ist der detaillierte Zeitplan zu finden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Nach einer Einführung im ersten Kapitel fasst das zweite Kapitel den Stand der Wissenschaft und Technik zu den in dieser Arbeit verwendeten Themengebieten zusammen. Im dritten Kapitel werden die Simulationsumgebung und die Modellierung der Sensortechnologien vorgestellt. Die Simulationsergebnisse mit einem charakteristischen Anwendungsszenario dokumentiert das vierte Kapitel. Eine Zusammenfassung und ein Ausblick schließen im fünften Kapitel den Hauptteil der Arbeit ab.

2 Stand der Technik

Im zweiten Kapitel wird die Bedeutung des Schienenverkehrs in der heutigen Zeit aufgezeigt und der Forschungsbeitrag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) herausgestellt (Kapitel 2.1 bis 2.3). Es wird der Stand der Technik bei Schienenfahrzeugen und ihren Fahrwerken aufgezeigt, um die Besonderheiten des NGT Fahrwerks einordnen zu können. Die technischen Grundbegriffe der Fahrwerksdynamik und die Arten von Fahrwerken erklärt Kapitel 2.4. Anschließend werden das NGT-Fahrwerk und dessen geplanter Prüfstand in Kapitel 2.5 und 2.6 beschrieben. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Messtechnik und Sensorik gelegt. Anschließend erläutert Kapitel 2.7 die, für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Modellbildung und Simulation. Als letztes wird das V-Modell als standardisierte Vorgehensweise in Entwicklungsprojekten kurz vorgestellt, welches auch bei diesem Projekt Anwendung findet (Kapitel 2.8).

2.1 Schienenfahrzeuge heute

Moderne Hochgeschwindigkeitszüge erreichen eine Höchstgeschwindigkeit von bis zu 600 km/h (Maglev-Reihe Japan). [1] Der schnellste Zug in Deutschland ist der ICE-3 mit einer Maximalgeschwindigkeit von 330 km/h (Betrieblich 300 km/h).

Trotz hoher Geschwindigkeit sind Schienenfahrzeuge eines der umweltfreundlichsten motorisierten Verkehrsmittel. Folgendes Diagramm vom Bundesumweltamt stellt die durchschnittliche Emission von Treibhausgasen in Gramm pro Personenkilometer von den am häufigsten verwendeten Verkehrsmitteln in Deutschland im Jahre 2017 dar: [2]

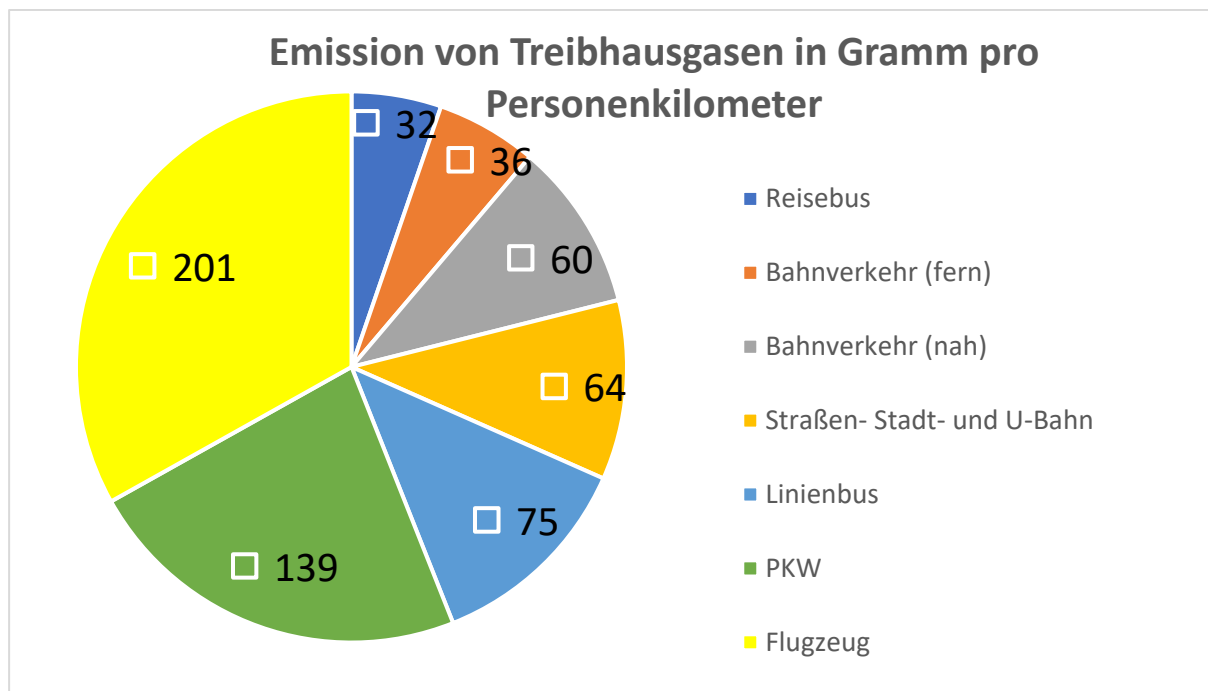


Abbildung 2: Emissionen von Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 und NO_2) in Gramm pro Personenkilometer

Die EU hat sich als Ziel gesetzt, bis 2050 etwa 50% des Personen- und Güterfernverkehrs in Europa von den Straßen und Flugzeugen auf Züge und Schiffe zu verlegen. Somit sollen bis dahin verkehrsbedingte Emissionen um 60% des aktuellen Stands gesenkt werden. [3]

In den letzten Jahren machte sich ein Anstieg des Schienenverkehrs im öffentlichen Personenverkehr in Deutschland bemerkbar, wie dieses Diagramm zeigt:

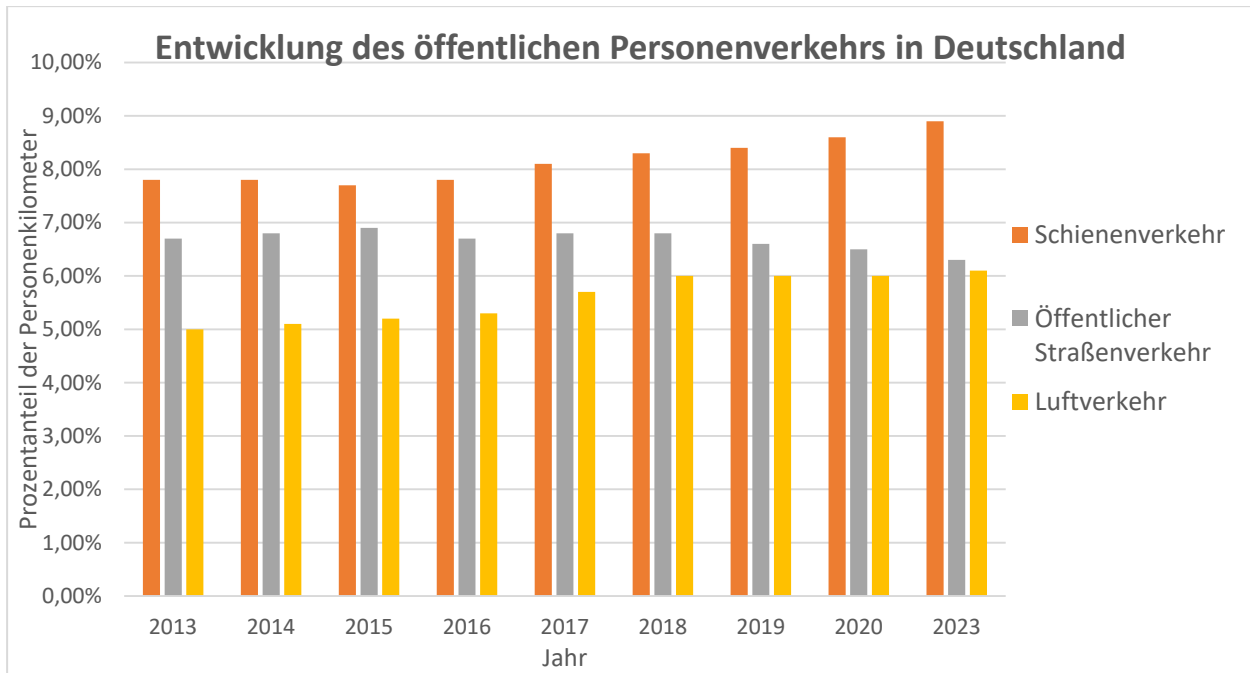


Abbildung 3: Prozentanteile der Personenkilometer des öffentlichen Personenverkehrs [4]

Legt man den Fokus auf die absoluten Zahlen der Bahnreisenden, ist ein stetiger Anstieg seit 2005 festzustellen:

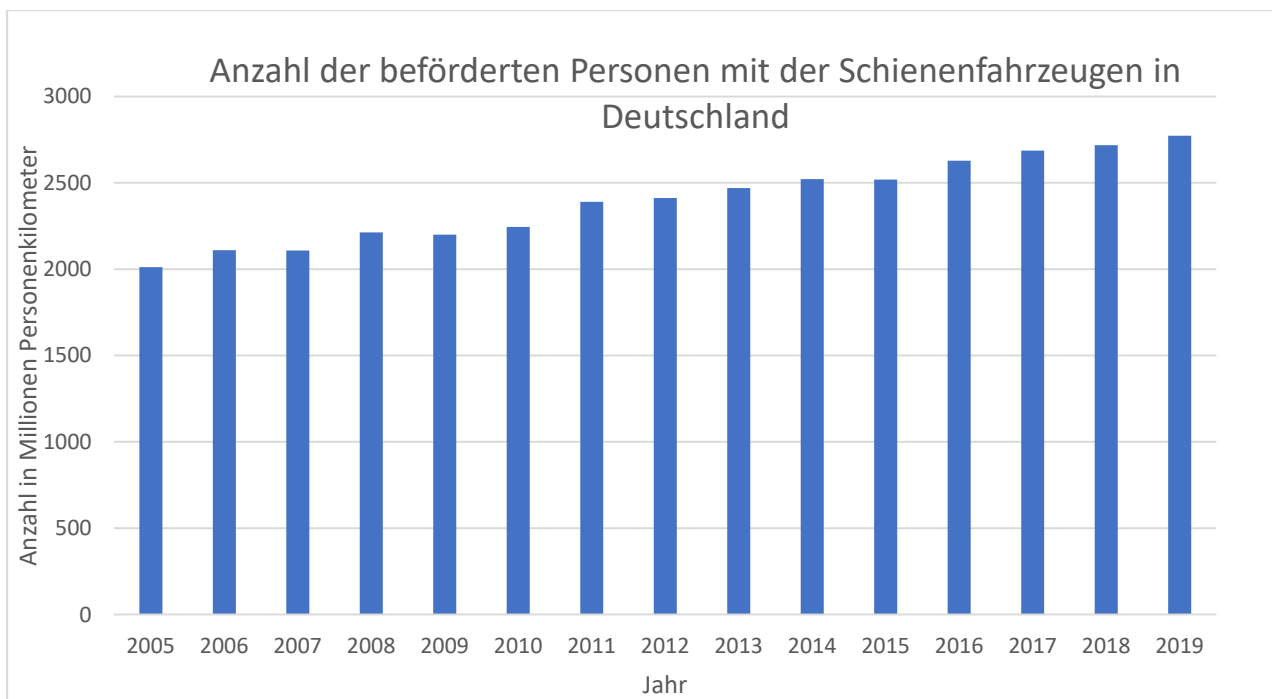


Abbildung 4: Entwicklung des Personenverkehrs auf den Schienen [4, S. 68]

Mit Blick auf den Güterverkehr ist der Anteil des Schienenverkehrs deutlich geringer als beim Personenverkehr. Der Anteil des Warentransportes lag 2014 gerade einmal bei knapp über 17% der gesamten Tonnenkilometer. Der Cargo-Verkehr befindet sich zum größten Teil auf Straßen, wie folgende Abbildung zeigt:

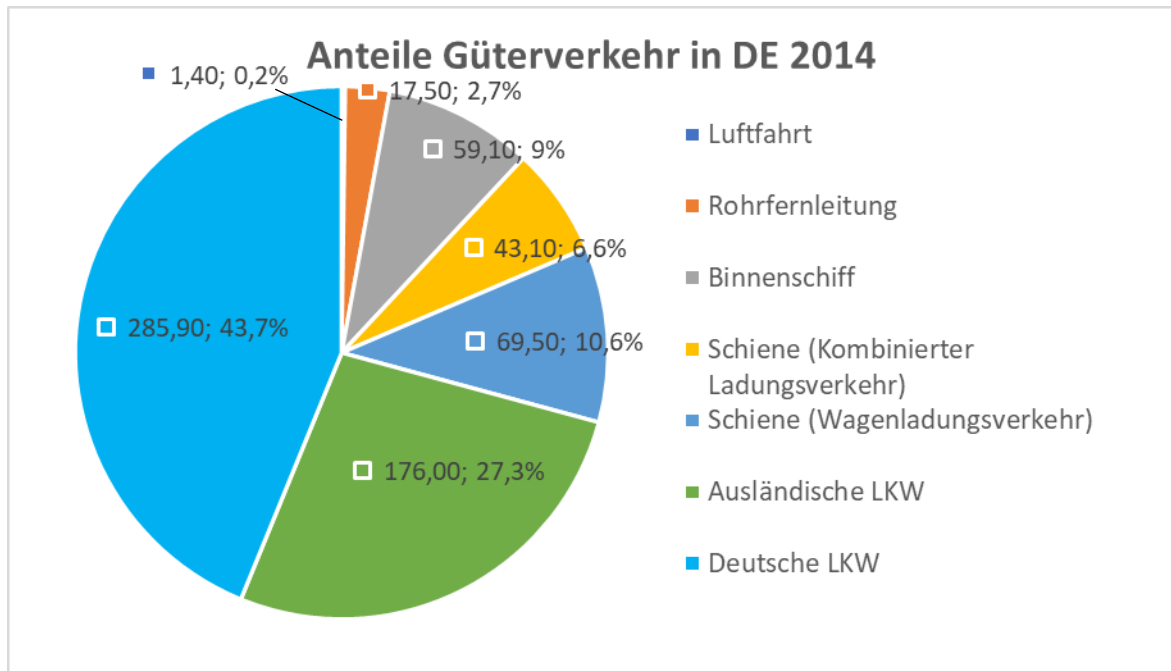


Abbildung 5: Verteilung des Güterverkehrs in Millionen Tonnenkilometer in DE [5]

Gründe dafür sind die aktuell noch hohen Kosten, die geringe Flexibilität und die relativ langen Transportzeiten, die mit einem Gütertransport mit Schienenfahrzeugen auf mittlerer Strecke, im Vergleich zum LKW-Transport, verbunden sind. [6, S. 65ff]

Weitere Nachteile des Schienenverkehrs gegenüber dem Straßenverkehrs sind: [7, S. 9]

- Aufwendigerer Fahrweg
- nicht jede Kleinstadt erreichbar
- kein Haus zu Haus Transport
- Kleine Transporteinheiten sind unwirtschaftlich
- Fahrplanzwang

Diesen Nachteilen stehen folgende Vorteile gegenüber:

- Wesentlich kleiner Platzbedarf
- Geringerer Energiebedarf und geringere Umweltbelastung
- Sehr hohe Geschwindigkeit auf mittlere Entfernungen möglich
- Sehr wirtschaftlich bei großen Transporteinheiten
- hohe Personenkapazität im Stadtverkehr (U-Bahn, Tram)
- Höherer Reisekomfort
- Wesentlich weniger Verkehrstopfer pro Jahr

Mit Hinblick auf die Vor- und Nachteile und der CO₂-Emissionen dieser beiden Verkehrsmittel aus Abbildung 2, wäre eine Umlagerung vom Güterverkehr von Straßen auf Schienen aufgrund der aktuellen Verkehrswende sinnvoll.

2.2 Das DLR

Eine Institution, welche sich unter anderem der Herausforderung der modernen Schienenfahrt stellt, ist das DLR.



Abbildung 6: DLR-Logo [8]

Das DLR entstand 1969 unter dem Namen Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) durch den Zusammenschluss mehrerer Einrichtungen, wie die Aerodynamische Versuchsanstalt, Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) und die Deutsche Forschungsanstalt für Luftfahrt (DFL). Seit der Fusion mit der Deutschen Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DARA) im Jahre 1997 wird der heutige Name (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. kurz DLR) geführt. Aktuell beschäftigt das DLR e. V. rund 8700 Mitarbeiter/-innen innerhalb von 27 Standorten in Deutschland und 4 Geschäftsstellen im Ausland. Vierzig Institute betreiben Grundlagenforschung und angewandte Wissenschaft in verschiedenen Projekten und Bereichen in der Luftfahrt, Raumfahrt, Verkehr, Energie, Sicherheit und Digitalisierung.

Robotik und Mechatronik Zentrum (RMC):

Das RMC ist das Kompetenzzentrum im DLR für Forschung und Entwicklung auf den Gebieten der Robotik, Mechatronik und der optischen Systeme. Die fachliche Kompetenz des RMC liegt im interdisziplinären Entwurf, der rechnergestützten Optimierung und Simulation mechatronischer Systeme und Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie deren Regelung und intelligente Programmierung. [8]

2.3 Projekt „Next Generation Train“

Die Anforderungen an den modernen Schienenverkehr hat sich in den letzten Jahren massiv gewandelt. Hersteller müssen in kürzester Zeit kundenindividuelle Produkte liefern, welche ein erhöhtes Maß an Sicherheit, Komfort und Effizienz bieten [9, S. 12]



Abbildung 7 NGT-Logo

11 DLR-Institute aus allen Fachbereichen beteiligen sich seit 2007 am Projekt Next Generation Train (NGT). Dabei bündelt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. seine Kompetenzen im Bereich der Schienenfahrzeugforschung. In diesem Rahmen werden an Fahrzeugkonzepten, wie einem doppelstöckigen Ultra-Hochgeschwindigkeitszug (NGT-HST), Methoden und Technologien für zukünftige Schienenfahrzeuge entwickelt.

Mit dem NGT-Projekt werden mehrere Ziele verfolgt. Zum einen soll die Geschwindigkeit auf 400km/h (NGT-HST und NGT-Cargo) gesteigert und gleichzeitig der Energieverbrauch im Vergleich zum ICE 3 um die Hälfte gesenkt werden. Zum anderen strebt man auch die Erhöhung des Komforts und der Sicherheit für den Fahrgast, sowie eine Reduktion von Lärm und Verschleiß an. Dazu existieren drei Fahrzeugkonzepte: NGT-HST (High Speed Train), NGT-Link und der NGT-CARGO.

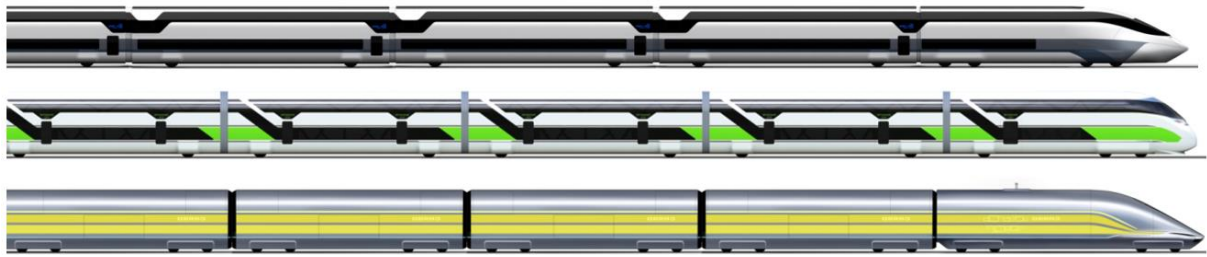


Abbildung 8 von oben nach unten: NGT-HST, NGT-Link, NGT-CARGO

Der NGT-HST soll bei einer Länge von 202m mit einer Höchstgeschwindigkeit von 400km/h Personen transportieren und die Großstädte verbinden, während der 120m lange NGT-Link die Passagiere mit 230km/h in die umliegenden kleineren Städte bringt. Der NGT-CARGO ist speziell für den Warentransport konzipiert. Mit 202m Länge und einer Höchstgeschwindigkeit von 400km/h ist dieser Zug genauso lang und schnell wie der NGT-HST. Mechanische Kupplungen zwischen den einzelnen Wägen der NGT-Schienenfahrzeuge sind nicht vorhanden. Die Wägen fahren mit gleicher Geschwindigkeit hintereinander her. Dadurch lässt der NGT-Cargo sich auch mit Wägen der anderen Züge der NGT-Familie virtuell kuppeln, um eine Kombination aus Personen- und Güterverkehr zu ermöglichen. Im Weiteren werden die Eigenschaften der NGT-HST genauer beschrieben: [10, S. 2]

- Einsatzgebiet: weltweit
- 2 Endwägen, 8 Mittelwagen mit insgesamt 202 m Länge
- 800 Sitzplätze (40% 1. Klasse und 60% 2. Klasse)
- Einzelwagenkonzept
- Bahnsteighöhe: 550mm und 2550mm
- Normalspur: 1435mm
- Referenzstrecke: Paris - Wien (1150km)



Abbildung 9: Der NGT High Speed Train [11]

Ein innovatives Leichtbaukonzept und ein aerodynamisches Design bilden den Wagenkasten. Angetrieben wird der Zug durch elektrische Synchronmotoren, welche sich an jedem einzelnen Rad

befinden. Je nach Geschwindigkeit kommen verschiedene Bremstechnologien, wie etwa Magnetaktuatoren und Haltebremsen zum Einsatz. Der Großteil der Bremsenergie wird dabei in die Motoren zurückgewonnen, was eine Erhöhung der Effizienz bewirkt. Das Fahrwerk des NGT ist für diese Arbeit besonders relevant. Es handelt sich hierbei um ein mechatronisches Einzelradfahrwerk mit aktiver Spurführung. Dies ermöglicht die Ausrichtung des Fahrwerks im Spurkanal, was gerade bei Bogenfahrten wichtig für die Verschleißsenkung ist. Die Simulation der Fahrgastströme, ein komfortables Innenraumdesign und die Analyse der Life Cycle Costs runden das NGT-Konzept ab. [12, S. 32-34]

2.4 Schienenfahrzeugtechnik

Im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit dieser Arbeit werden zunächst die wichtigsten Grundlagen aus der Schienenfahrzeugtechnik erläutert.

2.4.1 Schienenfahrzeuge als Verkehrsmittel

Ein Verkehrsmittel ist eine Vorrichtung oder Maschine zum Befördern von Personen oder Gütern. Verkehrsmittel können anhand von Kriterien, wie Bewegungsraum (Luft, Land oder Wasser) und deren Infrastruktur unterschieden werden. [13]

Folgendes Diagramm zeigt eine mögliche Unterteilung:

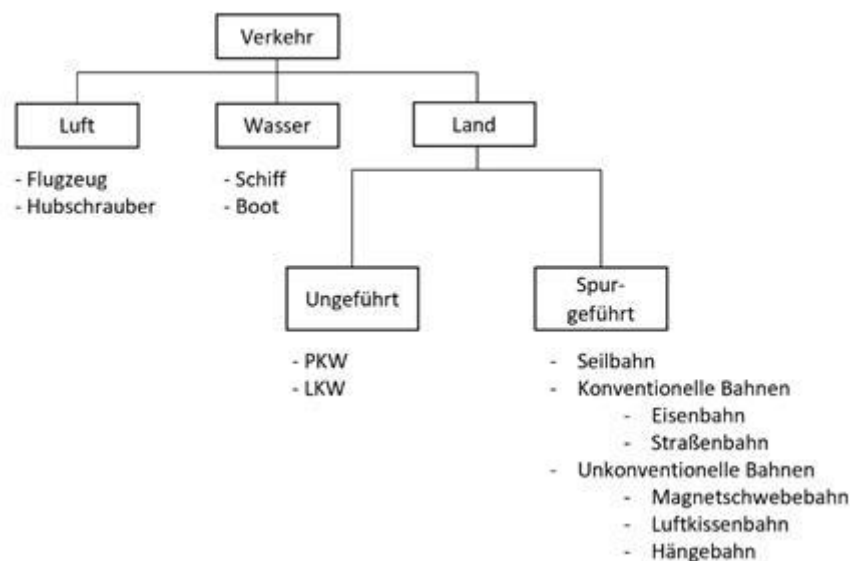


Abbildung 10: Unterteilung von Verkehrsmitteln (Nachbildung) [7, S. 7]

Bei Land-Verkehrsmittel ist es sinnvoll zwischen spurgeführte und nichtgeführte Infrastruktur zu unterscheiden. Nichtgeführte Land-Verkehrsmittel bedienen sich meistens einer Fahrbahn in Form von Straßen, brauchen diese aber nicht um sich von allein fort zu bewegen. Landverkehrsmittel mit Spurführung bewegen sich nur auf dafür vorgesehenen Spuren. [6, S.7] Dabei wird zwischen längs gerichteter, lateraler und vertikaler Führung unterschieden. Als Solche können Winden, bei Seilbahnen, Zahnrad-schienen, bei Bergbahnen oder Gleise, bei konventionellen Bahnen sein. Spurführungen können tragend, führend und treibend bzw. bremsend sein. [6, S.13] Eine tragende Spur übt lediglich vertikale Kräfte auf das Fahrzeug entgegengesetzt der Schwerkraft aus, sodass nur eine von drei translatorischen Freiheitsgraden festgelegt ist. Ein Beispiel dafür ist ein Luftkissenfahrzeug (ohne Luftkissenbahn). Führende Spuren können, zum Beispiel mit Hilfe von Kraft- und Formschlüssen, zusätzlich lateral wirkende Kräfte ausüben, wie es bei einem klassischen Schienenfahrzeug mit Spurkranz am Rad der Fall ist. Ist eine Spurführung treibend, so muss diese

auch eine Energieumwandlung ermöglichen, um das Fahrzeug anzutreiben (Beschleunigung in Längsrichtung). Bei einem klassischen Schienenfahrzeug geschieht das in der Regel durch einen Kraftschluss zwischen Rad und Schiene. [7, S. 7-13]

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf gleisgeführte Schienenfahrzeuge gelegt.

2.4.2 Grundlagen

Folgende Grundbegriffe und Zusammenhänge aus der Schienenfahrzeugtechnik sind für das weitere Verstehen dieser Arbeit von Bedeutung: Es gibt ein raumfestes dreidimensionales, kartesisches Koordinatensystem im Gleis sowie ein sich mit dem Fahrzeug mit der Geschwindigkeit v mitbewegendes Koordinatensystem mit den Achsen x , y und z . Ersteres deckt alle ortsfesten Objekte ab. Letzteres stellt das Referenzkoordinatensystem des bewegten Fahrzeugs dar. Folgende Verschiebungen und Verdrehungen können an Objekten am Fahrzeug gegenüber dem Gleis betrachtet werden: [14, S. 18] (siehe auch Abbildung 11)

- v_x : Längsbewegung
- v_y : laterale Bewegung
- v_z : vertikale Bewegung
- φ_x : Rollen
- φ_y : Nicken
- φ_z : Gieren

Das Gleis stellt eine wichtige Komponente im System Rad-Schiene dar. Der Abstand beider Schienen wird als Spurweite bezeichnet und beträgt in den meisten Teilen Europas 1435 mm. Vernachlässigt man den Verschleiß am Rad, ist das Rad an seiner Lauffläche kegelförmig, wobei ein Spurkranz eine zu starke Querbewegung des Zuges formschlüssig verhindert (Entgleisungsschutz). Die Breite der Lauffläche ist somit der Bereich eines Rades, in dem es Kontakt mit der Schiene haben kann, bevor es zum Spurkranzanlauf (Entgleisung) kommt. Diese wird als Spurkanal definiert und beträgt etwa 6mm bis 8mm [15, S. 24-25]

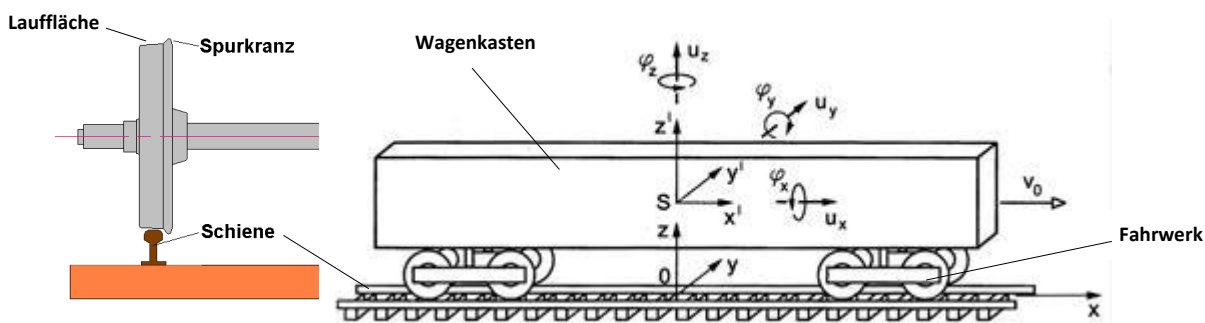


Abbildung 11: (a) Radprofil [16] (b) Koordinatensysteme und Bewegungen von Schienenfahrzeugen [14]

2.4.3 Fahrwerksdynamik

Fahrwerke sind das Verbindungsglied vom Wagenkasten mit dem Gleis. In erster Linie müssen sie hierbei die Gewichtskräfte abstützen, das Fahrzeug lateral in der Spur führen und Traktions- und Bremskräfte übertragen. [15, S. 350]

Man unterscheidet bei Fahrwerken zwischen zwei grundlegenden Bauarten. Dem Drehgestell und dem Einzelachsfahrwerk. In Abbildung 12 sind das Drehgestell Y25 und ein Standard-Einzelachsfahrwerk dargestellt. [17, S. 93] Zusätzlich unterscheidet man zwischen Fahrwerke mit ein oder zwei Radsätzen oder Radpaaren und zwischen angetriebenen und nicht angetriebenen Rädern.



Abbildung 12: (a) Drehgestell Y25 (b) Standard Einzelachsfahrwerk [18]

Während bei dem Einzelachsfahrwerk der Radsatz über Federn am Wagenkasten aufgehängt ist, sind in dem Drehgestell-Rahmen zwei Radsätze miteinander verbunden und drehbar gegenüber dem Wagenkasten gelagert. [17, S. 93]

Von der Art der Lagerung der Räder am Radträger innerhalb eines Radpaares lassen sich ebenfalls zwei Arten von Fahrwerkstypen unterscheiden:

- Konventionelles Fahrwerk
- Einzelradfahrwerk

Konventionelles Fahrwerk:

Seit den ersten Eisenbahnen im 19. Jahrhundert haben sich konventionelle Radsatz-Fahrwerke in der Bahnindustrie etabliert. Ein derartiges Fahrwerk besteht im Wesentlichen aus folgenden Elementen:

Fahrwerkrahmen:

Der Fahrwerkrahmen hat die Funktion, eine Verbindung aller Baugruppen des Fahrwerks herzustellen.

Radsatz:

Der Radsatz stellt eine Verbindung zweier Räder mittels einer starren Radsatzwelle dar. Dementsprechend sind diese in ihrer Drehbewegung gekoppelt. [17, S. 94]

Federung:

Die Federung bildet ein Feder-Dämpfer-System und dämpft und federt dementsprechend stoßartige Kraftimpulse oder Beschleunigungsspitzen, welche von Unebenheiten in der Gleisoberfläche oder Verunreinigungen zwischen Rad und Gleise verursacht werden. Außerdem hat sie noch folgende Aufgaben: [17, S. 35]

- Übertragung von Fliehkräften
- Gewährleistung einer Entgleisungssicherheit bei Gleisverwindungen
- Schwingungstechnische und akustische Entkopplung vom Wagenkasten und dem Radsatz

Wird das Fahrzeug im Gleis lateral ausgelenkt (Fahrweganregung), tritt wegen der starren Verbindung der Räder und deren Geometrie der sog. Selbstzentrierungseffekt auf. Da sich dann der Radsatz außermittig befindet, berühren die Räder das Gleis mit unterschiedlichen Radradien. Dabei bewegen sich die Räder unterschiedlich schnell nach vorne. Im Berührungspunkt bewirkt eine Gegenkraft eine Lenkbewegung in die andere Richtung. Eine Längsbewegung des Radsatzes ist das Resultat, welches als Wellenlauf bezeichnet wird. (Siehe Abbildung 13) Der Vorteil dieser Bewegung ist, dass sich dadurch eine gleichmäßige Abnutzung am Radprofil einstellt. [17, S. 35]

Ein dafür ausgelegtes Dämpfer-System sorgt für stabiles Verhalten bei diesem schwingenden System.

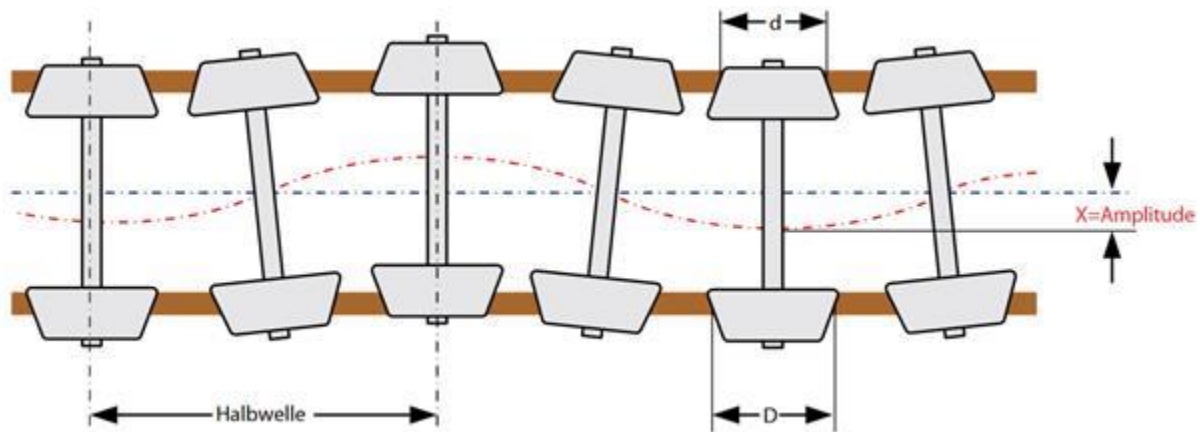


Abbildung 13: Charakteristischer Wellenlauf eines Radsatzes [17, S. 35]

Einzelradfahrwerk

Der Unterschied vom Einzelradfahrwerk zum konventionellen Fahrwerk ist, dass die gegenüberliegenden Räder nicht mit einer Welle verbunden sind. Diese sind daher winkel- und somit auch drehzahlunabhängig voneinander. Der Selbstzentrierungseffekt bleibt durch das Fehlen einer Welle aus, weshalb dem Wellenlauf aktiv entgegengewirkt werden muss. Dies kann mit einer mechatronischen Spurführung geschehen. Vorteil eines Einzelradfahrwerks ist die geringere Reibung zwischen Rad und Schiene bei Kurvenfahrten ohne Spurkranzanlauf, da sich die Drehzahl der Räder an den Kurven-Radius der jeweiligen Gleise anpassen lässt (ähnlich wie bei einem Differenzial beim Automobil). Dadurch wird das Schienenfahrzeug nicht nur energieeffizienter und leiser, es erhöht sich auch die Lebensdauer des Rades, da weniger Verschleiß anfällt. Ein solches mechatronisch geregeltes Einzelradfahrwerk ist auch das Fahrwerk vom NGT-HST, was im nächsten Kapitel beschrieben wird.

2.4.4 Schlupf zwischen Rad und Schiene

Bei einem idealen Abrollvorgang des Rades auf der Schiene beim fahrenden Zug sind die Fahrtgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit des Rades betragsmäßig gleich groß. Legt man genaueres Augenmerk auf die Dynamik des Rad-Schiene-Systems, ist ein Schlupf zwischen Rad und Schiene zu beobachten. Der Abrollvorgang wird durch verschiedene physikalische Einflüsse beeinflusst. Der Schlupf ist in der Schienenfahrwerkstechnik ein entscheidender Faktor für den Verschleiß. Ist die Umfangsgeschwindigkeit des Rades nicht gegengleich der Schiene, kommt es zu einer Relativbewegung und somit auch zu Verschleiß des Rades und der Schiene. Ein Verschleiß des Rades hat auch immer eine Veränderung des Radprofils zu Folge, was zu noch mehr Kontaktfläche mit der Schiene und somit wieder zu mehr Verschleiß führt usw.

2.5 Das NGT Fahrwerkskonzept

Voranschreitende Entwicklung von Sensorik, Aktorik und schnelle Datenverarbeitung bietet die Möglichkeit, an neue mechatronischen Fahrwerkskonzepten zu forschen. Dabei beeinflusst man gezielt das Fahrverhalten der Fahrwerke durch aktive mechatronische Systeme. Bei mechatronischen Fahrwerken werden aktive Federn und Dämpfer sowie Sensoren, Regelkreise und Informationssysteme verwendet, um das Fahrwerk an verschiedene Gegebenheiten anzupassen. Gerade bei Hochgeschwindigkeitszügen, erweisen sich diese Errungenschaften als sehr vorteilhaft. [17, S. 124]

2.5.1 Das NGT-HST Fahrwerk

Das NGT-HST Fahrwerk ist ein solches mechatronisches Fahrwerk. Ziel ist es die Steuerbarkeit in allen Betriebsfällen sowie ein effizienteres Laufverhalten zu erreichen. Abbildung 14 zeigt eine

vereinfachte CAD-Darstellung des Fahrwerks, mit den beiden Hauptelementen, nämlich die Radträger und Sekundärrahmen sowie die einzeln gelagerten Räder. [19, S. 1-3]

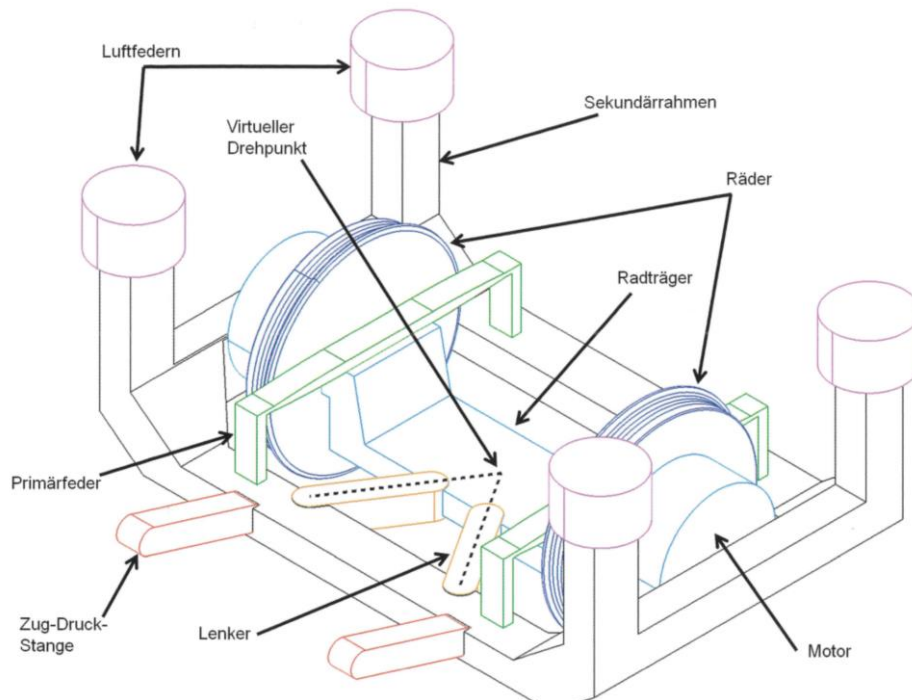


Abbildung 14 Vereinfachte Darstellung des NGT Fahrwerks

Zusätzlich befindet sich an jedem Rad, über Gelenkkupplungen verbunden, welche sich am Radlager abstützt, ein eigener Synchronmotor. Dieser stellt das benötigte Drehmoment, ohne zwischengeschaltetes Getriebe, an das Rad zur Verfügung. Der gekröpft U-förmige Radträger spart großen Bauraum ein, welcher für den stufenlosen Niederflurdurchgang im doppelstöckigen Fahrzeuginnenraum nötig ist. Das Fahrwerk enthält darüber hinaus zwei Federstufen:

- Primärfederung
- Sekundärfederung

Die Primärfedern, welche sich zwischen Radträger und Sekundärrahmen befinden, sind als aktiv geregelte Faserverbundblattfedern ausgeführt. Diese sind für die Federung der beiden Elemente in vertikaler Richtung zuständig und übertragen die Rad-Schiene-Kräfte.

Vier Luftfedern, die an den oberen Ecken des Sekundärrahmens angebracht sind, bilden die Sekundärfederstufe. Sie federt den Wagenkasten gegenüber den Sekundärrahmen in vertikaler und lateraler Richtung ab.

Der Radträger ist über einen Lenker mit dem Sekundärrahmen verbunden. Der Lenker ist dabei so angeordnet, dass sich in der Mitte des Radträgers ein virtueller Drehpunkt bildet, um dessen Hochachse der Radträger gegenüber den Sekundärrahmen drehbar ist. Somit ist eine Lenkbewegung möglich. Über zwei Zug-Druck-Stangen am Sekundärrahmen werden Traktions- und Bremskräfte zum Wagenkasten übertragen. [20, S. 91]

Wie im vorherigen Kapitel erwähnt, geht mit dem Fehlen einer Winkelkopplung der beiden Räder auch der Selbstzentrierungseffekt verloren. Um die Stabilität des Radpaares zu gewährleisten, muss eine aktive Spurführung diese Funktion im NGT-Fahrwerk übernehmen.

Eine Sensorik überwacht hierbei kontinuierlich die laterale Position und den Gier-Winkel des Radträgers gegenüber den Schienen. Sobald sich das Radpaar im Gleis in lateraler Richtung

verschiebt, wird das Rad auf einer Seite geringfügig beschleunigt und das Rad auf der anderen Seite geringfügig verlangsamt, sodass ein Stell-Moment um die vertikale Hochachse entsteht. Dies führt zu einer Lenkbewegung des Radträgers und somit zu einer Rückkehr des Radpaares in die Gleismitte. [21, S. 30-36]

2.5.2 Fahrwerksprüfstand

Beginnend im Jahr 2019 wird innerhalb von drei Jahren ein funktionsfähiger Prototyp des Fahrwerks als „Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk“ (NGT-FuN) im Maßstab 1:1 entwickelt. Der Prototyp wird mit umfangreicher Sensorik und Messtechnik ausgestattet. Ein Rapid-Control-Prototyping-System (RCP) steuert und regelt das Fahrwerk mit dem dazugehörigen Integrationsprüfstand.

Zunächst werden Untersuchungen auf einem DLR-internen Integrationsprüfstand stattfinden, um wichtige Funktionen des Fahrwerks und der Regelung vorab zu testen. Dieser Integrationsprüfstand simuliert nur Fahrten bei geringen Geschwindigkeiten und Belastungen. Um Informationen über das Betriebsverhalten unter realen Bedingungen zu erhalten, muss das NGT Fahrwerk anschließend auch auf einer externen Prüfeinrichtung unter Höchstgeschwindigkeit, maximaler Belastung und diversen Umwelteinflüssen zum Einsatz kommen. Der Bremssystem-Hersteller Knorr-Bremse unterhält am Standort in München seit 2016 den Rollprüfstand ATLAS, der sich auf eine Höhe von 15m und einem Gewicht von 760t bemisst (siehe Abbildung 15). Mit dieser externen Prüfeinrichtung kann das Verhalten von Fahrwerken unter Simulation verschiedener Umwelteinflüsse wie Regen, Fahrtwind, Hitze und Kälte untersucht werden. Dabei sind Geschwindigkeiten von bis zu 350 km/h auf unterschiedlichen Spurweiten möglich. [22, S. 40]



Abbildung 15: ATLAS-Prüfstand von Knorr Bremse [23]

Im Folgenden wird der Fokus auf den internen 1:1 Integrationsprüfstand (des NGT-FuN) gelegt.

Folgende Abbildung zeigt die wichtigsten mechanischen Komponenten des Prüfstandes und ihre Positionen.

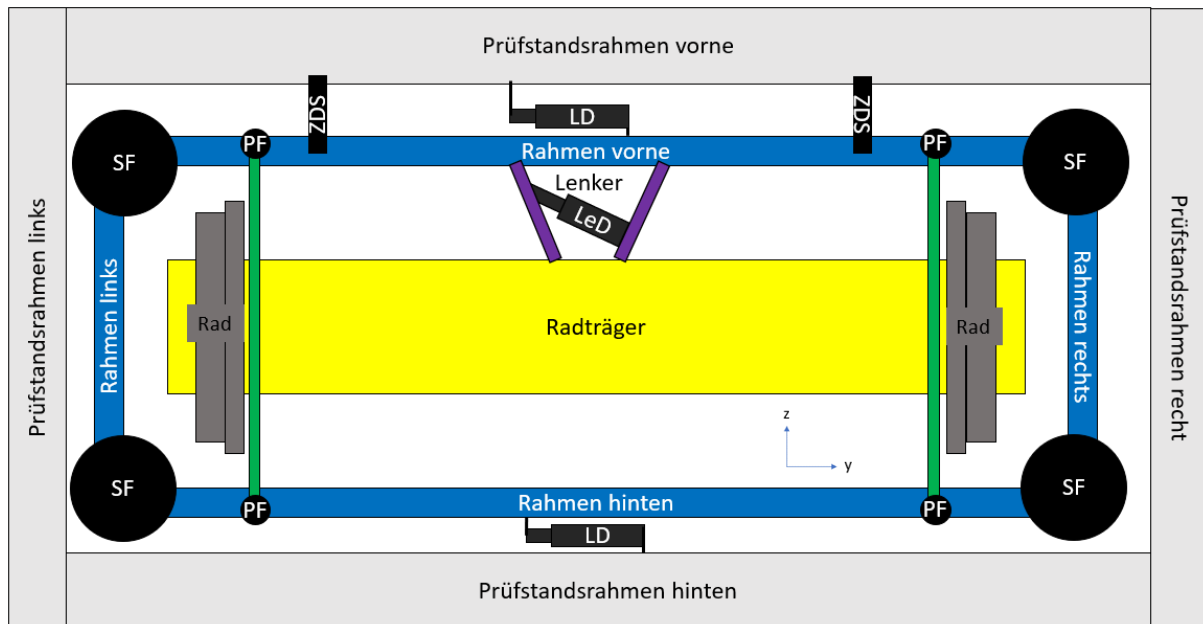


Abbildung 16 Skizze NGT-FuN mit allen für dieses Projekt relevanten Komponenten [PF: Primärfeder, SF: Sekundärfeder, LD: Lateraldämpfer, LeD: Lenkdämpfer, ZDS: Zug-Druck-Stange]

Prüfstandsrahmen:

Der Prüfstandsrahmen ist das Gerüst des Prüfstands. Dieser bildet gleichzeitig die Eigenschaften des Wagenkastens und deren Verbindung zu dem Fahrwerksrahmen über die Sekundärfeder ab. An dem Prüfstandsrahmen ist auch eine Rolle mit dem Radius 0.3m angebracht, welche eine unendliche Gleisstrecke simuliert.

Räder/Rolle:

Die Räder werden mittels Motoren angetrieben und durch den Rad-Rolle-Kontakt, an einem Berührungspunkt pro Rad, wird die Rolle ebenfalls bewegt. Dieser Kontaktpunkt simuliert den Rad-Schiene-Kontakt.

Fahrwerk:

Das Fahrwerk entspricht dem NGT-Fahrwerk, welches in Kapitel 2.2.1 beschrieben wurde, im 1:1 Maßstab mit allen mechanischen Komponenten, wie Radträger, Fahrwerksrahmen, etc. und allen mechatronischen Komponenten, wie Aktoren und Sensoren, welche auch für das Fahrwerk im Einsatz verwendet werden sollen.

Lateraldämpfer:

Zwei Dämpfer, welche vorne und hinten den Fahrwerksrahmen mit dem Prüfstandsrahmen verbinden, dämpfen laterale Kraftstöße in y-Richtung ab.

Lenkdämpfer:

Der Lenkdämpfer dämpft stoßartige Gier-Momente ab.

2.6 Messtechnik und Sensoren im NGT FuN Integrationsprüfstand

Zu den mechanischen Komponenten beinhaltet der NGT-FuN Prüfstand zahlreiche elektrische und mechatronische Komponenten. Die Motoren an den Rädern bilden die Aktorik und eine Vielzahl an Sensoren bilden die Messtechnik und Sensorik im System. Auf die einzelnen Sensortechnologien, welche im NGT-FuN eingesetzt werden, wird im Folgenden genauer eingegangen.

2.6.1 Grundlagen Sensorik

Ein Sensor oder auch Detektor oder Geber ist eine technische Vorrichtung zur Ermittlung von physikalischen (z.B. Druck, Temperatur, Winkel, Kraft) oder chemischen (z.B. pH-Wert, O₂-Konzentration) Eigenschaften oder Größen. Dabei werden die physikalischen bzw. chemischen Informationen nach einem gewissen Messprinzip/Sensorprinzip in interpretierbare, elektrische, Signale umgewandelt. Die zu detektierenden Größen werden qualitativ zu einer Referenzgröße oder quantitativ als Messgröße erfasst und weitergeleitet. Oft ist ein linearer Zusammenhang zwischen der Messgröße und dem elektrischen Ausgangssignal vorhanden. [24, S. 3]

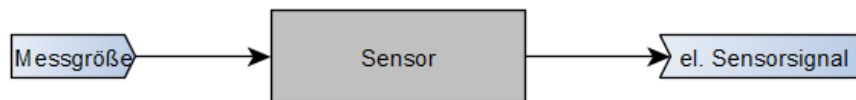


Abbildung 17 Blockschaltbild Sensor

Die Eingangsgröße eines Sensors wird Messgröße genannt und ist die physikalische Größe, die zu messen ist. Die Ausgangsgröße wird als Sensorgröße oder Messsignal bezeichnet und ist in der Regel ein elektrisches Signal. [24, S. 4]

Sensorik nimmt bei mechatronischen Fahrwerken eine entscheidende Rolle ein. Vor allem in regelungstechnischen Aufgaben ist mindestens ein Sensor essenziell, da sonst der aktuelle Ist-Zustand nicht detektiert und so keine Closed-Loop-Struktur (Regelkreis) aufgebaut werden könnte.

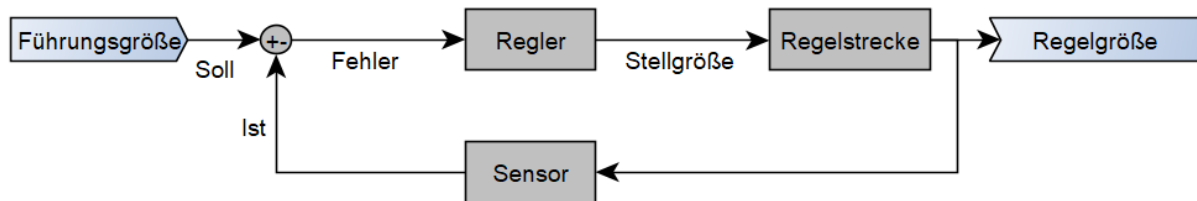


Abbildung 18 klassischer closed-loop Regelkreis

Wie man bei einem geschlossenen Regelkreis sieht, muss eine Rückführung zum Regler gelangen, welcher Auskunft über den aktuellen Ist-Stand der Regelgröße gibt. Ohne diesen wäre nur eine offene Steuerung möglich.

Folgende Grundbegriffe der Sensorik sind für das weitere Verstehen dieser Arbeit von wichtiger Bedeutung: [25, S. 6-7]

Messbereich:

Der Bereich eines physikalischen Signals, das von einem Sensor erfasst werden kann.

Auflösung:

Kleinsten Änderungsschritt des Eingangssignals, der vom Sensor erfasst werden kann.

Empfindlichkeit:

Das Verhältnis zwischen einer Änderung am Ausgangssignal und einer Änderung am Eingangssignal.

Ungenauigkeit:

Messungen sind immer fehlerbehaftet. Zwischen dem wahren Wert der Messgröße und dem gemessenen Ergebnis existiert immer eine gewisse Abweichung. Das Maß der Ungenauigkeit gibt an, wie hoch diese Abweichung ist. Es wird unterschieden zwischen systematischen und zufälligen Abweichungen. Die maximale Abweichung zwischen dem wahren und dem messtechnisch ermittelten Messwert nennt man Genauigkeit. Da der wahre Messwert zu keinem Zeitpunkt exakt genau bestimmbar ist, wird meist ein Bereich angegeben, in dem sich der wahre Wert mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aufhalten könnte.

Linearitätsbereich:

Der Bereich des Messbereiches, in dem von einem linearen Zusammenhang zwischen Messwert und Amplitude des Ausgangssignals ausgegangen werden kann. Die maximale Rest-Abweichung innerhalb des Linearitätsbereiches wird als Linearitätsfehler bezeichnet und ist meist in % des Messbereiches angegeben. Bei den meisten Sensoren befindet sich diese Abweichung an den Rändern des Linearitätsbereiches.

Messfehler:

Es gibt zwei grundlegende Arten von Messfehlern: [24, S. 21-24]

- Systematischer Fehler
- Statistischer Fehler

Systematische Fehler werden durch den Sensor verursacht z.B. falsche Kalibrierung, Drift oder Alterung. Sie lassen sich durch sorgfältiges Untersuchen der Fehlerquelle kompensieren. Zufällige (statistische) Fehler werden durch unvermeidbare, regellose Störungen verursacht. Bei wiederholter Messung weichen die Einzelereignisse voneinander ab. Typische Beispiele hierfür sind: Rauschen, verursacht durch Schwingungen mechanischer Komponenten oder thermisches Rauschen bei elektrischen Signalen (Amplitudenrauschen, Phasen-Jitter).

Externe/interne Sensoren:

Bei internen Sensoren handelt es sich um Messvorrichtungen, die sich „on board“ (an dem zu vermessenen Objekt) befinden und deren Eigenschaften direkt messen können, wie zum Beispiel Temperatursensoren und Encoder. Externe Sensoren liefern hingegen Informationen aus der Umgebung und können sich entfernt von dem zu vermessenen Objekt aufhalten. Beispiele hierfür sind Laser-Abstandssensoren oder Kameras.

Im NGT-FuN Prüfstand sind eine Vielzahl an Sensoren konzipiert. Diese sollen Ausschluss von Positionen, wie Abstände oder Winkel geben und Kräfte und Momente messen, die auf die mechanischen Komponenten wirken. Diese Informationen werden zum einem für die aktiven mechatronischen Funktionen, wie zum Beispiel die Spurführung genutzt (Funktionssensorik) und zum anderen sollen die Eigenschaften der mechanischen Komponenten während des Betriebs des Prüfstands beobachtet werden, wie Materialauslastung durch Kräfte und Dehnungen und Bewegungen der Komponenten zueinander (Referenzsensorik).

Folgende Sensoriken bilden die wichtigsten Bestandteile der Messtechnik im NGT-FuN:

- Winkel/Drehzahl-Sensorik
- Distanzsensorik
- Kraft- und Momentsensorik

2.6.2 Winkel/Drehzahlsensorik

Ein, von mehreren möglichen, Messverfahren zur Bestimmung von Winkeln und Drehzahlen ist ein Encoder. Encoder basieren meistens auf einem optischen Sensorprinzip, das im Durchlichtverfahren die Transmission des Lichtes durch einen ortsfesten Schlitz und eine sich mit der Welle mitdrehende Schlitzscheibe misst. Stehen beide Schlitze übereinander, so kann das Licht durchscheinen. Stehen die Lichtschlitze über den Stegen, kann das Licht nicht durchscheinen. An dieser Charakteristik werden zwei binäre Zustände definiert. Die gemessene Lichtintensität wird in ein elektrisches Signal umgewandelt. Encoder können einen zweiten, um eine Viertel Periode phasenversetzten, Sensorkanal besitzen. Als eine Periode wird hier ein Schlitz- plus oder ein Stegwinkel bezeichnet. Dadurch entsteht eine höhere Winkelauflösung. Misst man die Zeit zwischen den Licht-Impulsen, kann auf die Drehzahl der Räder und somit auf die Geschwindigkeit des Zugs geschlossen werden.

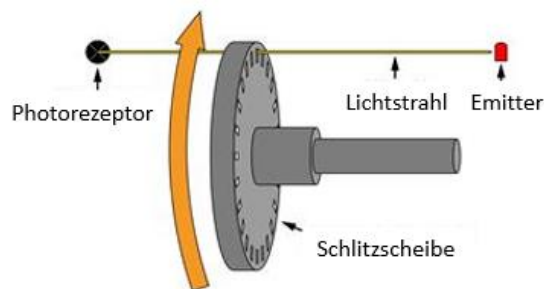


Abbildung 19: Encoder Prinzip [26]

Das Sensorsignal ist ein Rechtecksignal. Die Winkelgeschwindigkeit berechnet sich über die Frequenz dieses Signals, mittels der Impulszeit T (Kehrwert der Frequenz) und des Winkels zwischen den Rillen auf der Schlitzscheibe φ_n :

$$w = \frac{\varphi_n}{T}$$

Formel 1 Berechnung Winkelgeschwindigkeit [w : Winkelgeschwindigkeit, φ : Winkel zwischen 2 Rillen, T : Impulszeit]

Die Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs errechnet sich mit Hilfe der Winkelgeschwindigkeit und dem Radius des Rades (Vorausgesetzt der Schlupf wird vernachlässigt):

$$v = w * r_{wheel}$$

Formel 2 Berechnung Fahrtgeschwindigkeit [v : Geschwindigkeit, w : Winkelgeschwindigkeit, r_{wheel} : Radius Rad]

Sensorkette des Encoders:

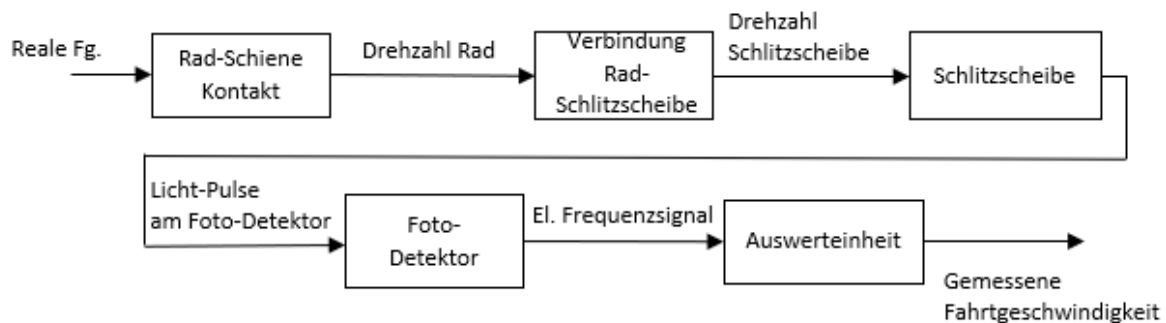


Abbildung 20 Sensorkette Encoder

Eine Sensorkette beschreibt die Energieumwandlungen, welche in den relevanten Komponenten des Sensors geschehen von der Messgröße bis zum technischen Ausgangssignal, welches auf die Messgröße zurückgerechnet wird. Die Pfeile zwischen den Kästen beschreiben die Größen bzw. die Signale, die in andere umgewandelt werden.

2.6.3 Distanzsensorik mit LVDT-Sensoren

Die Distanzsensorik kann die absolute Distanz von einem Anfangspunkt zu einem Endpunkt messen, wie es z. B. Laser-Abstandssensoren tun. Sie kann aber auch die relative Distanz zwischen zwei Messpunkten messen. Dies ist bei LVDT-Sensoren der Fall. Innerhalb des Messbereiches wird jedoch ein Nullpunkt festgelegt und die durch zwei Messpunkte sehr genau bekannte Messlänge des Signalhubs auf die Messlänge kalibriert.

Der NGT-FuN Prüfstand beinhaltet zwei Arten von Distanzsensorik-Technologien:

- LVDT-Sensoren
- Lasersensoren

Ein LVDT (Linear Variable Differential Transformer) Linear-Sensor funktioniert nach einem induktiven Messprinzip und stellt im Wesentlichen einen Differentialtransformator dar. Das ist eine Spezialform eines Transformators. Der Aufbau besteht in der Regel aus einer Primärspule, welche mit einem Wechselstrom mit konstanter Frequenz und Amplitude durchflossen ist und zwei Sekundärspulen, welche als Ursache der durchflossenen Primärspule eine Induktionsspannung aufbauen (mag. Kopplung).

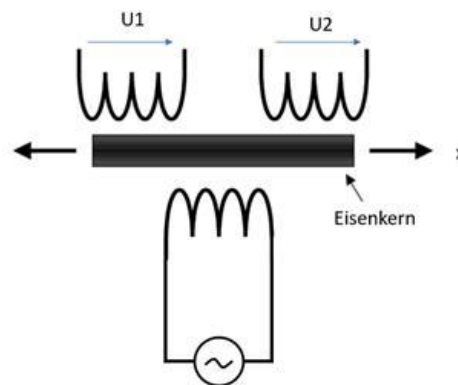


Abbildung 21: Schaltskizze LVDT [27, S. 96]

Die Sekundärspulen sind gegenphasig in Reihe geschaltet, dadurch subtrahieren sich die Spannungen an ihren Anschlüssen. [27, S. 94] Ein Eisenkern, welcher sich innen durch die Spulen hindurchbewegt, sorgt für eine Änderung der Permittivität in den Sekundärspulen. Befindet sich der Eisenkern genau in der Mitte, so ist der Aufbau symmetrisch und die Induktionsspannung der beiden Spulen gleichgroß. Am Ausgang des Differentialverstärkers liegt eine 0V-Amplitude an. Wird die Symmetrie gestört, so entsteht eine Ausgangsspannung, deren Phase in Bezug zur Erregung (Primärspannung), die Richtung und deren Amplitude die Größe der Asymmetrie angibt. Es entsteht ein direkter Zusammenhang zwischen Linearbewegung x und der Ausgangsspannung u . Dieser Zusammenhang ist in erster Näherung linear.

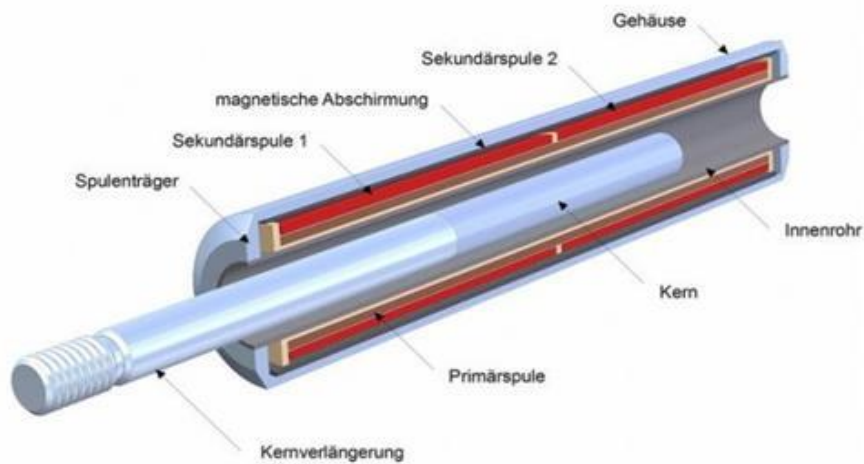


Abbildung 22: Aufbau eines LVDT-Sensors [28]

Die Spannung wird anschließend von einer Auswerteinheit vorgefiltert, digitalisiert und dann in die Messgrößen-Einheit zurück gerechnet. Für die Sensorkette gilt dann wie folgt:

Sensor-Kette LVDT:

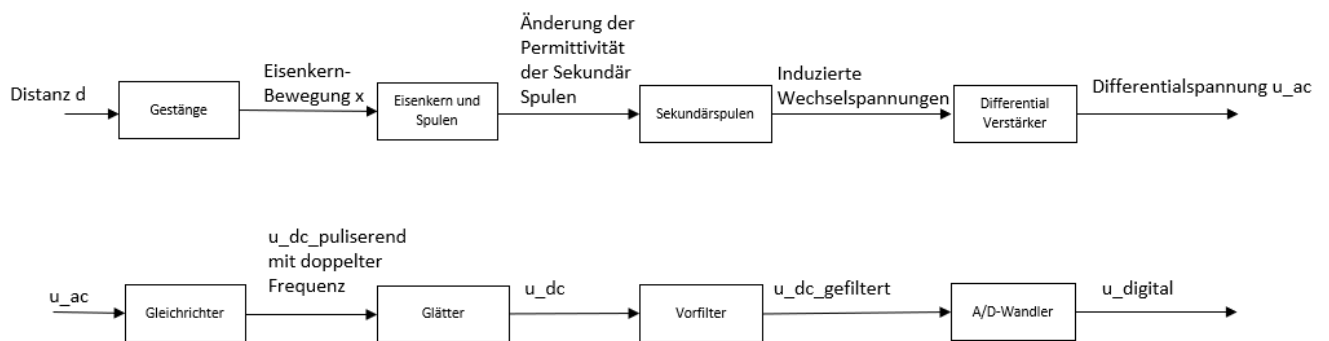


Abbildung 23 Sensor-Kette LVDT

Vorteile von LVDT-Sensoren gegenüber Laser-Distanzsensoren: [28]

- Höhere Auflösung
- Höhere Genauigkeit
- Unempfindlicher gegen Umwelt-Einwirkungen (gekapseltes Sensorprinzip)

Nachteile von LVDT-Sensoren gegenüber Laser-Distanzsensoren:

- Nur Punkt zu Punkt Messungen möglich
- Ein externes Trägersignal wird benötigt
- Es muss eine mechanische Verbindung zu beiden Messpunkten geben

Die LVDT-Sensoren werden immer dort eingesetzt, wo eine hochwertige und robuste Messung im NGT-FuN benötigt wird, wie z. B. zur Bestimmung des Gier-Winkels und der lateralen Position für die Spurführung.

2.6.4 Distanzsensorik mit Lasersensoren

Laser-Abstandssensoren basieren auf einem optischen Sensorprinzip. Die gängigsten Sensorprinzipien sind:

- Laufzeitmessung (time-of-light)
- Laserinterferometrie
- Lasertriangulation

Laufzeitmessung:

Bei der Distanzmessung mittels Laufzeitmessung wird ein kurzer Lichtpuls emittiert. Die Pulslaufzeit Δt ist die Zeit, die der Lichtstrahl benötigt, um vom Emitter, zu einem Reflektor wieder zurück zum Emitter zu laufen. Durch Messen dieser Laufzeit kann man über die Lichtgeschwindigkeit die Distanz zwischen Emitter und Objekt, an welchem der Reflektor abgebracht ist, berechnen.

$$d = \frac{c * \Delta t}{2}$$

Formel 3 Berechnung der Distanz d in m aus der Laufzeit [c : Lichtgeschwindigkeit in m/s, Δt : Laufzeit (hin und zurück) in s]

Der Vorteil dieses Verfahrens ist die geringe Reaktionszeit. Das Verfahren hat Messbereiche von einem Meter bis mehrere 10 Kilometer. Ein Nachteil ist die erforderliche Messung sehr kurzer Zeiten (Nano- bis Pikosekunden). Höhere Auflösungen als einige Zentimeter zu erreichen, erweist sich daher als sehr schwierig.

Laserinterferometrie:

Laserinterferometer messen keine absoluten Weglängen, sondern nur die relative Änderung bei Verschiebung des Zieles bzw. eines Referenzspiegels. Beim Verschieben des Spiegels erfahren die ausgesandten und reflektierten Lichtwellen abwechselnd konstruktive und destruktive Interferenz. Dieses, aus den beiden Wellen entstehende, Lichtsignal, durchläuft eine Periode bei der Verschiebung der zu messenden Distanz um genau eine halbe Lichtwellenlänge. Um die gesuchte Wegstrecke zu ermitteln, zählt man diese Perioden und multipliziert sie mit der Lichtwellenlänge. Genauigkeiten von etwa 1/100 der verwendeten Wellenlänge sind bei dieser Methode zu erwarten. Bei sichtbarem Licht ist das im Nanometerbereich [29, S. 47-48]

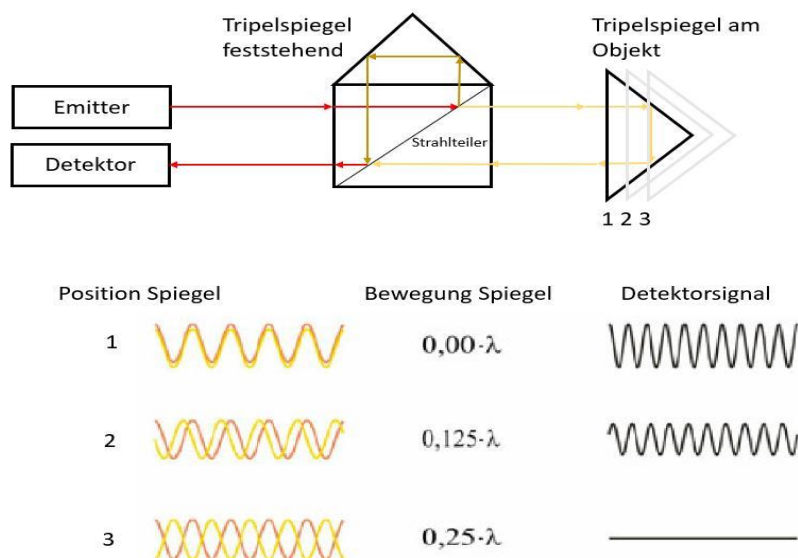


Abbildung 24: Prinzip Interferometer [29, S. 27]

Der Vorteil dieser Methoden gegenüber dem Laufzeitverfahren ist die höhere Auflösung und der geringe messtechnische Aufwand. Die maximal messbare Distanz ist jedoch geringer.

Lasertriangulation:

Im aktuellen Sensorkonzept des NGT-FuN hat man sich für die Lasertriangulation-Technik entschieden, weshalb diese hier auch genauer beschrieben wird.

Bei der Lasertriangulation wird ein Laserstrahl auf das Messobjekt fokussiert und mit einer daneben im Sensor befindlichen Kamera, einer ortsauflösenden Photodiode oder einer CCD-Zeile beobachtet. [29, S. 45]

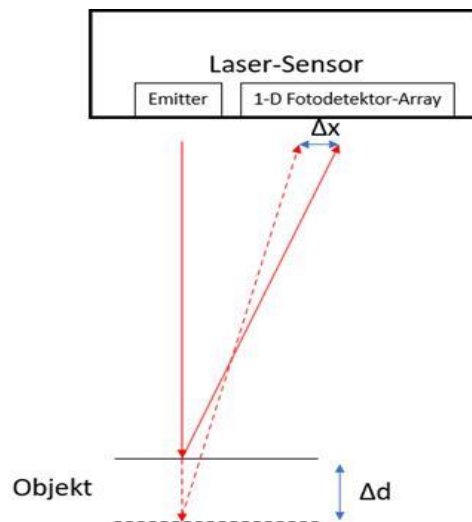


Abbildung 25: Prinzip Laser-Distanzsensor (Triangulation) (eigene Nachbildung) [29, S. 45]

Verändert sich die Distanz zwischen dem Messobjekt und dem Sensor, ändert sich auch der Winkel, unter dem der Lichtpunkt beobachtet wird. Die Position seines Abbildes auf dem Fotoempfänger verändert sich als direkte Ursache ebenfalls. Aus dieser Positionsänderung wird, mittels Winkelfunktionen, auf die Entfernung des Objektes vom Laserprojektor geschlossen.

Ein Vorteil ist der Umstand, dass es sich um rein trigonometrische Zusammenhänge handelt und die Messung darum zeitkontinuierlich erfolgen kann.

Aus dem Grund eignet sich diese Methode speziell für die Automatisierungstechnik, da man somit die Positionen von bewegten Objekten kontinuierlich messen kann. Da die Genauigkeit mit dem Abstand zwischen Sender und Empfänger abnimmt, ist das Verfahren nur für geringe Entfernungen geeignet. Aus demselben Grund weisen Lasersensoren mit Lasertriangulationstechnologie höhere Nichtlinearitäten auf als anderen Laser-Abstandssensoren. In der Regel sind Laseremitter und Detektor in einem gemeinsamen Gehäuse zusammengefasst.

Signalverarbeitung:

Ein Lasersensor wandelt ein Abstandssignal in ein elektrisches Sensorsignal um. Der Pegel dieses Ausgangssignals unterscheidet sich von Sensor zu Sensor. Gängige Spannungsbereiche sind 0-5V; 0-10V; $\pm 5V$; $\pm 10V$. Dieses analoge Signal wird, genau wie bei dem LVDT-Sensor auch, in einem A/D-Wandler in ein digitales Signal umgewandelt.

Sensorkette:

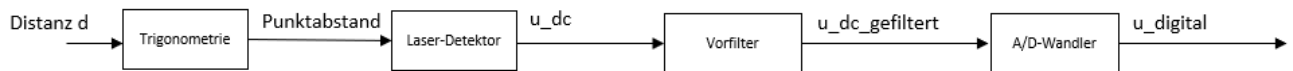


Abbildung 26 Sensorkette Laser-Abstandssensor

Vorteile gegenüber LVDT-Sensoren:

- Abstände können auch nur in einer Raumachse gemessen werden
- keine mechanischen Punkt zu Punkt Verbindungen nötig
- Geringer Platzbedarf
- Entfernungen von sich drehenden Körper messbar

Nachteile gegenüber LVDT-Sensoren:

- Empfindlich gegen Schmutz und Helligkeit
- Geringere Auflösung und Genauigkeit

2.6.5 Kraft- und Momentsensorik

Es gibt verschiedene Arten von Kraftaufnehmer-Technologien. Gängigsten Sensorprinzipien sind zum einen das piezo-elektrische Prinzip und zum anderen das resistive Sensorprinzip mittels Dehnungsmessstreifen. Der Zusammenhang zwischen der Kraft, die auf den Sensor einwirkt und das elektrische Ausgangssignal sind bei beiden Sensortypen proportional. Je mehr Kraft wirkt, desto mehr Spannung ist am Ausgang messbar. Im Idealfall ist dieser Zusammenhang linear.

Im NGT-FuN Prüfstand sind hauptsächlich Kraftsensoren und Momentsensoren eingebaut, welche mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen (kurz DMS) funktionieren. Diese sind wie folgt aufgebaut:

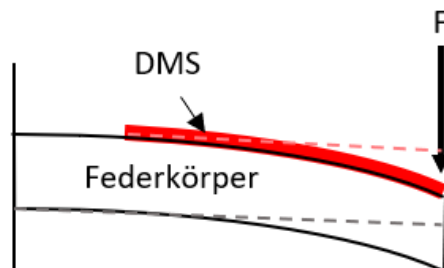


Abbildung 27 Kraftsensor mit DMS

Diese Art von Kraftaufnehmer bestehen immer aus einem Federkörper, in den die Kraft eingeleitet wird. Diese Kraft führt zu einer minimalen Verformung des Federkörpers. An geeigneter Stelle sind DMS aufgeklebt, die gedehnt werden und deshalb ihren elektrischen Widerstand ändern.

Die Dehnungen und Widerstandsänderungen sind sehr klein und durch direktes Abgreifen der Spannung an einem Widerstand kann nur sehr geringe Signalleistung erzeugt werden. Eine höhere Auflösung und ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis werden durch Verwenden einer Wheatstone'schen Messbrücke (H-Bücke) ermöglicht.

In der Regel sind vier solcher DMS zu einer Brückenschaltung zusammengeschaltet. Speist man diese Messbrücke mit einer Spannung, so ergibt sich eine Ausgangsspannung, die proportional zur angeleiteten Kraft am Federkörper ist. [30, S. 13-14]

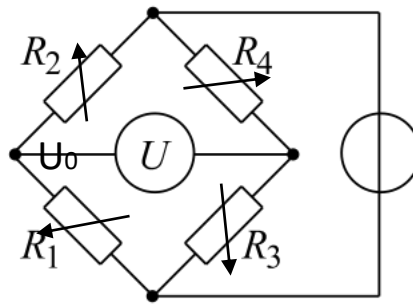


Abbildung 28 Wheatstone-Brücke mit 4 veränderlichen Widerständen (DMS)

$$u = u_0 * \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right)$$

Formel 4: Wheatstone'sche Brückenschaltung [u : Ausgangsspannung in V, u_0 : Speisespannung in V, R1-4: DMS Widerstände in Ohm]

Die Spannung u wird gemessen und dient als analoges Ausgangssignal für den Sensor.

Wirkt keine Kraft bzw. ist keine Dehnung vorhanden, ist die Brücke abgeglichen, da alle vier Widerstände den gleichen Betrag haben. Ändert sich nun die Dehnung, erhöhen sich zwei der Widerstände (auf der Dehnungsseite am Federkörper zum B. R1 und R2) und zwei Widerstände nehmen ab (auf der gestauchten Seite des Federkörpers zum B. R3 und R4). Die Brücke dem zu Folge ist nicht mehr abgeglichen. Es kommt zu einer Brückenspannung u .

Dieses Ausgangssignal wird anschließend von einer Auswerteinheit, genau wie bei den Distanzsensoren auch, gefiltert, digitalisiert und in die Messgröße zurück gerechnet. In diesem Fall in die Kraft F in N.

Sensorkette des Kraftsensors mit DMS:

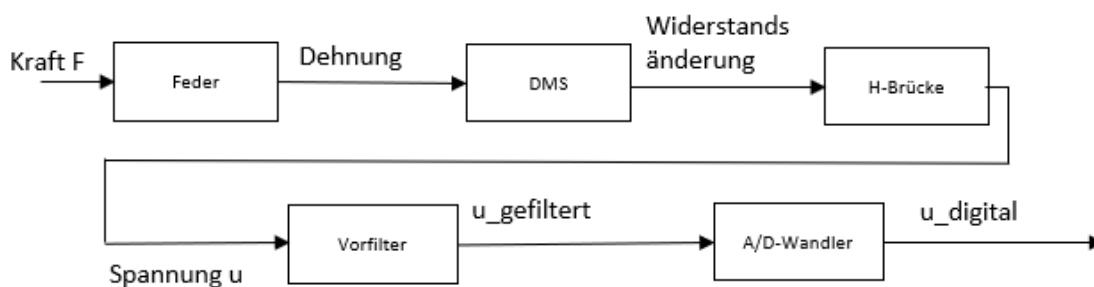


Abbildung 29 Sensorkette Kraftsensor mit DMS

Vorteile: [31]

- Kaum Messabweichung durch Kriechen
- Einfach zu kalibrieren
- Zahlreiche Fehlereinflüsse können elektronisch kompensiert werden (Temperatureinflüsse, Offsetfehler)

Nachteile:

- Großes Gehäuse
- Für kleine und hochfrequente Kraftsignale ungeeignet

Im Rahmen des NGT-Fahrwerks werden hauptsächlich auf DMS-Basierte Kraftaufnehmer verwendet.

Für die Momentsensorik werden Sensoren eingesetzt, die ebenfalls mit DMS-Technologie funktionieren. Dabei werden Momente in Torsionswinkel umgewandelt. Diese können ebenfalls mit Dehnungsmesstreifen gemessen werden.

2.7 Modellbildung und Simulation

Durch die in Kapitel 1.1 vorgestellte Problemstellung der späten Verfügbarkeit des physikalischen Aufbaus, wird eine modellbasierte Entwicklung angewandt. Im Rahmen dieser Masterarbeit finden daher Methoden und Werkzeuge der Modellbildung und Simulation Verwendung. Grundlagen der gängigen Simulations-Tools werden in diesem Kapitel beschrieben.

2.7.1 Grundlagen

Eine Simulation ist eine Methode zur Analyse von Systemen. Überwiegend wird dynamisches Systemverhalten über der Zeit analysiert, mögliche Szenarien getestet und technische Systeme optimiert. [32, S. 3]

Das dann virtuell meist mit einem Computerprogramm erstellte Simulationsmodell nennt man Simulator oder Simulationsumgebung. Diese stellt eine Abstraktion des zu simulierenden Systems dar. Bei der Simulation werden Berechnungen an einem Modell durchgeführt, um Erkenntnisse über das reale System zu gewinnen. Der Ablauf des Simulators mit konkreten Werten (Parametrierung) wird als Simulationsexperiment bezeichnet. Dessen Ergebnisse können dann interpretiert und auf das zu simulierende System übertragen werden. Gerade in der Ingenieurstätigkeit im Bereich der Fahrzeugtechnik sowie der Luft und Raumfahrt wird das dynamische Verhalten von Systemen mit dieser Methode unter möglichst realen Bedingungen ermittelt, um so noch effizientere und leistungsstärkere Produkte und Technologien zu entwickeln. Somit ist es möglich vor der eigentlichen Inbetriebnahme Regelparameter zu tunen, Fehlerszenarien zu simulieren und Software zu testen und gegebenenfalls anzupassen. Außerdem ist es möglich Fehlerszenarien zu simulieren, welche in der Praxis vorkommen können. Es sind auch virtuelle Szenarien simulierbar die in der Praxis normalerweise nicht auftreten sollten, wie gefährliche Fehlfunktionen oder Extremsituationen. [33, S. 7-9]

Vor jeder Simulation müssen die relevanten Eigenschaften des realen Systems identifiziert werden und es wird ein passendes mathematisches Modell aus physikalischen und technischen Elementen abgeleitet (Modellierung). Kein Modell wird je das physikalische Verhalten zu 100% beschreiben können. Bei der Modellbildung ist darauf zu achten, dass das Modell so detailliert wie nötig und gleichzeitig so einfach wie möglich ist. Denn es gilt: Je tiefer ein Modell die reale Physik widerspiegelt, desto komplizierter ist es und desto rechenaufwendiger wird die spätere Simulation. Auf der anderen Seite dürfen nicht zu viele Vereinfachungen getroffen werden, sodass die Simulationsabweichung, also die Abweichung zwischen realem und simuliertem System, nicht zu groß wird. Wie tiefgehend ein System modelliert werden soll, ist von mehreren Faktoren abhängig:

- Anwendung des Modells (Regelungstechnik, Simulation, Optimierung)
- Branche (Bauteiltechnik, Mechatronik, Gebäudetechnik)
- Einflüsse von außen auf das System (Temperaturabhängigkeit, Druckabhängigkeit)
- Rechenkapazität
- Kenntnis oder Beschreibbarkeit des Systems

Zur Modellbildung und Simulation gibt es eine grobe Unterteilung der gängigen softwaretechnischen Möglichkeiten:

- Signalorientiert
- (physikalisch) Objektorientiert

2.7.2 Signalorientierte Modelliersprache

Im Wesentlichen handelt es sich bei signalorientierter Simulation um ein „bausteinartiges“ Aufbauen von expliziten Gleichungen (Zuweisungen). Diese werden bei graphischen Umgebungen als Blöcke mit Ein- und Ausgängen dargestellt.

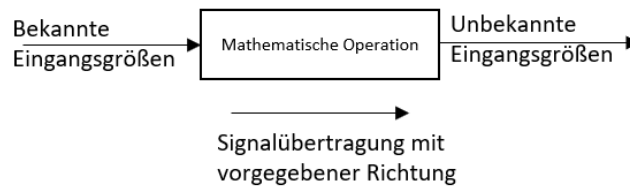


Abbildung 30: Signalfluss-Block [34, S. 6]

Diese Blöcke beinhalten explizite mathematische Operationen, wie Grundrechenarten, Differentialgleichungen oder lineare Gleichungen. Diese sind im Signalfluss gerichtet. Das bedeutet, dass die Eingangsgrößen bekannt sein müssen. Die Ausgangsgrößen werden nach der Berechnung ausgegeben und können wieder als Eingangsgrößen für andere Blöcke verwendet werden. Über Rückführungen oder bestimmte Blöcke, können auch implizite Gleichungen dargestellt werden. [34, S. 6]

Aus dem zu simulierenden System wird ein Wirkplan erstellt. Dieser kann dann mittels einer Software, wie Matlab/Simulink oder Scilab/Xcos mit Hilfe von Blöcken aus verschiedenen Bibliotheken aufgebaut werden. Ein Solver löst dann die Differenzialgleichungen und algebraischen Gleichungen auf berechnet das Zeitverhalten der Zustandsgrößen und Variablen.

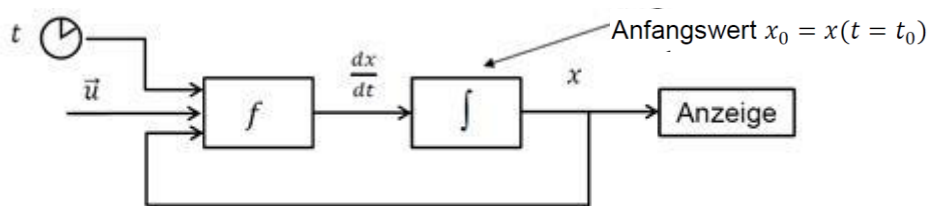


Abbildung 31: Beispiel eines n.l. Signalflussplans 1. Ordnung [34, S. 9]

Vor und Nachteile von signalorientierter Modelliersprache [34, S. 17-21]:

Vorteile:

- Regelungstechnische Systeme leicht realisierbar
- Controller-Programmierung vereinfacht durch Signalflussorientierung möglich. (HITL und FMU)
- Mathematische Zusammenhänge leicht erkennbar

Nachteile:

- Schwierige Modellbildung bei komplizierten Systemen.
- Eine numerische Berechnung ist bei großen Gleichungssystemen sehr ineffizient und manchmal unmöglich
- Aus dem Wirkplan ist das reale System kaum ersichtlich oder nachvollziehbar
- Schon bei kleinsten Änderungen in der Struktur des realen Systems (nicht Parametrisierung) ändert sich der Wirkplan stark
- Probleme bei algebraischen Schleifen
- Probleme bei Singularitäten (Modelle vom Index >1)

2.7.3 (Physikalisch) objektorientierte Modelliersprache

Eine sehr einfach zu handhabende und physiknahe Modellierung kann mit Hilfe von objektorientierter Programmiersprache erfolgen. Ein Beispiel dafür ist Modelica. Diese ist vor allem in der Modellierung von mechatronischen Systemen in Automotive, Raumfahrt und Robotik vertreten. Denn dort sind viele Systeme aus mechanischen, elektrischen und hydraulischen Teilsystemen sowie aus Steuerungssystemen gleichzeitig aufgebaut. Um die physikalischen Modelle zu bilden, werden Differentialgleichungen, algebraische und diskrete Gleichungen verwendet. [35, S. 19]

Die meisten Simulationsprogramme zur physikalisch objektorientierten Simulation enthalten sowohl eine graphische Oberfläche zur Modellierung von physikalischen Systemen wie auch eine textuelle Beschreibungsmöglichkeit für Gleichungen, Kommentare, etc. [36]

Vor- und Nachteile von objektorientierter Modelliersprache [34, S. 9]:

Vorteile:

- Schnelleres und einfacheres Modellieren durch physikalischen Modellaufbau (Feder, Masse statt Gain und Integrator)
- Effiziente und robuste Simulation
- Benutzerdefinierte Modellkomponenten erstellbar
- 2D/3D Animation möglich
- Einfacher im Nachhinein Änderungen an der Struktur des Systems vorzunehmen als bei signalorientierten Modelliersprachen

Nachteile:

- Embedding sehr kompliziert
- Signalverarbeitungen schwierig
- Mathematische Zusammenhänge und Systemverhalten kaum am Modell ablesbar

2.7.4 Mehrkörpersimulation (MKS)

Die Mehrkörpersimulation, kurz MKS, ist eine Methode der objektorientierten Simulation von mechanischen Systemen, bei der reale Mehrkörpersysteme durch mehrere starre Körper abgebildet werden. Zusätzlich schränken idealisierte kinematische Gelenke die Bewegungsfähigkeit der Körper zueinander ein.

In einer Mehrkörpersimulation wird das mechanische System in viele einzelne starre Körper aufgeteilt, welche mit verschiedenen Gelenkarten oder virtuellen Kraftelementen verbunden werden. Dadurch ist an jedem Objekt bzw. Knotenpunkt eine feste Anzahl an Freiheitsgrade definiert. Ein komplexes oft nichtlineares Gleichungssystem aus Differentialgleichungen und algebraischen Gleichungen entsteht und wird mit gängigen Solvern, wie dem Runge-Kutta-Verfahren bei Differentialgleichungen und dem Newton-Verfahren bei algebraischen Gleichungssystemen aufgelöst. [37, S. 4-7] Mehrkörpersimulationen machen es auch möglich, mechanische Systeme als 3D-Modelle abzubilden. Das in diesem Projekt verwendete Simulationsprogramm ist Simpack.

2.7.5 Co-Simulation

Eine Co-Simulationsumgebung beschreibt eine Zusammenfassung zweier oder mehrerer Simulationsumgebungen in einer Architektur, welche verschiedene Bereiche eines Systems abdecken. Diese Simulationsprogramme können mit unterschiedlichen Simulationstools, wie Simulink, Simpack, Dymola, etc. entwickelt worden sein. Eine Co-Simulation fasst diese in einem

Modell-Zusammenschluss zusammen und bildet eine Simulationsumgebung des gesamten Systems. Bei einem Simulationsvorgang mit einer Co-Simulationsumgebung werden die einzelnen Umgebungen innerhalb der Co-Simulation wie Black-Box Systeme behandelt, die aus ihren Eingangsgrößen, unabhängig von den anderen Simulationsumgebungen, Ausgangsgrößen berechnen, die an die nächste Umgebung weitergegeben werden. Dabei lösen verschiedene Solver die einzelnen Umgebungen der Co-Simulation separat. [38, S. 171-185]

Vorteil einer Co-Simulation ist, dass Bereiche aus verschiedenen Domänen so in einer Simulationsumgebung kombiniert werden und diese unabhängig mit verschiedenen Solvern und Zeitschritten gelöst werden können und gleichzeitig ein System abbilden. Dabei lassen sich die Vorteile von objektorientierter und signalorientierter Simulation vereinen und der Berechnungsaufwand wird auf mehrere Simulationstools verteilt.

2.8 Das V-Modell

Um ein Projekt erfolgreich und zeitgerecht zu bearbeiten sind strukturierte Arbeitsabläufe und präzises Zeitmanagement erforderlich. Das V-Modell ist ein in der Industrie weit verbreitetes Werkzeug zur Planung und Durchführung von Entwicklungs-, und Weiterentwicklungsprojekten. Es beinhaltet Projektmanagement und Qualitätssicherung. [39, S. 2-5] Dieses besteht aus einem absteigenden Ast und einem aufsteigenden Ast, geformt als ein V (Abbildung 32). Spezifikation und Design bilden den absteigenden, die Umsetzung, Integration und Test den aufsteigenden Ast. Diese strukturelle Vorgehensweise lässt das Projekt auch bei wechselndem Personal für alle Beteiligten übersichtlich und nachvollziehbar erscheinen.

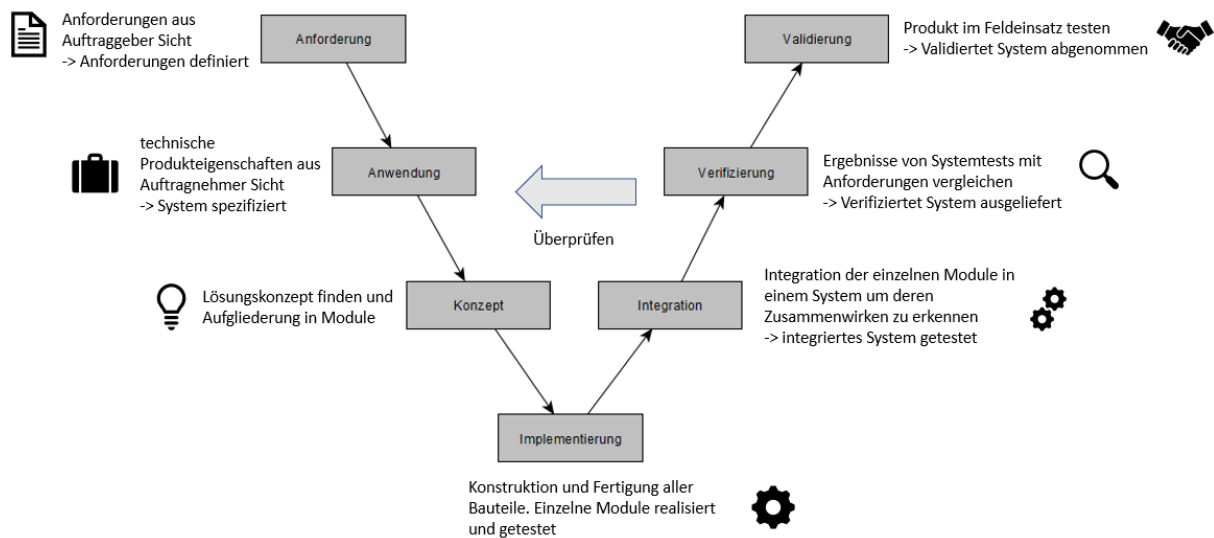


Abbildung 32: Das V-Modell am Beispiel des NGT-FuN Projekts (eigene Nachbildung) [39]

Während der aufsteigenden Phasen werden die Entwicklungsfortschritte immer wieder anhand der Aspekte der absteigenden Phasen überprüft. Somit gewährleistet man eine konstante Einhaltung der Anforderungen. Anhand der Erkenntnisse der Integration und der Produkttests kann auch das Konzept angepasst werden, wenn das ursprüngliche Konzept nicht zu den geforderten Anforderungen führen kann.

3 Entwicklung einer Co-Simulationsumgebung für den NGT-FuN Integrationsprüfstand

Abschnitt 3 beschreibt die Methodik, wie von den Anforderungen bis hin zu den Ergebnissen hingearbeitet wird. Es zeigt zu Beginn die Anwendung des V-Modells auf den Arbeitsablauf (Kapitel 3.1). Der Aufbau der Co-Simulationsumgebung wird anschließend detailliert mit allen Modellen beschrieben. Der strukturelle Aufbau der Sensormodelle wird erst generisch aufgezeigt (Kapitel 3.5) und anschließend in Kapitel 3.6 bis 3.9 an konkreten Sensortechnologien angewandt. Im Anschluss daran werden die erstellten Sensormodelle in die Co-Simulationsumgebung integriert (Kapitel 3.10).

3.1 Anwendung des V-Modells

Die Erstellung einer Simulationsumgebung im Teilbereich Konzept im V-Modell hat Vorteile im weiteren Ablauf des Projekts. Durch eine virtuelle Testumgebung können vorab Softwaretests und Simulationsexperimente durchgeführt werden. Dazu muss die mechanische Konstruktion noch nicht vollständig abgeschlossen sein. Durch eine Co-Simulation können einzelne Module bzw. Teilmodelle miteinander vereint werden, um so virtuelle Integrationstests durchführen zu können. Eine Integration und Verifikation am realen System kann dadurch zwar nicht umgangen werden, doch kann man die, dadurch gewonnenen Erkenntnisse für die Implementierung und für die späteren Abläufe im rechten Strang des V-Modells nutzen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Elemente des Werkzeugs V-Modell folgendermaßen verwendet:

Anforderung/Anwendung:

Die Systemanforderungen lassen sich aus der Aufgabenstellung im Kapitel 3.4 ableiten. Für die Sensorsimulation wurde ein Teileilgrad der Modellierung festgelegt. Für jeden simulierten Sensor befindet sich im Anhang III eine Mind-Map mit den Eigenschaften, welche im Modell berücksichtigt werden müssen. Es können zu diesem Zeitpunkt keine Anforderungen an die Simulationsgenauigkeit gegeben werden, da keine Tests mit dem realen System zur Verifikation derselben durchgeführt werden können.

Konzept:

Das Konzept ist eine Co-Simulationsumgebung, welche die Simpack-Mehrkörpersimulation mit der Signalverarbeitung und Automatisierungstechnik in MATLAB/Simulink verbindet. In der MKS ist die Prüfstandsmechanik modelliert. Bei einer Simulation gibt sie ideale physikalische Signale an eine Sensorschnittstelle weiter, welche aus diesen Signalen technische, stör- und fehlerbehaftete Sensorsignale erzeugt. Die Simulink-Umgebung verwendet die realen Signale als Eingang für die Automatisierungstechnik im RPC-System und gibt Stellgröße an die MKS zurück. Somit wird ein geschlossener Regelkreis erzeugt und die Mechanik, Automatisierungstechnik und die Sensorik, mit ihren physikalischen und technischen Eigenschaften, ist in einer Simulationsumgebung zusammengefasst.

Implementierung:

Die Softwareimplementierung ist ab Kapitel 3.5 der Arbeit beschrieben.

(Virtuelle) Integration:

Simulationsexperimente mit der Co-Simulationsumgebung und allen dafür vorgesehenen Modulen bilden eine Inbetriebnahme aller Komponenten ab. Simulationsergebnisse mit dieser Simulationsumgebung sind nützlich für die spätere mechanische Integration.

Verifizierung:

Im Kapitel 4 werden realistische Simulationsszenarien verwendet, um die implementierten Eigenschaften der Sensorik zu veranschaulichen. Die Sensorparameter stammen dabei aus den Datenblättern der verwendeten Sensoren.

Mittels der entwickelten Simulationsumgebung wird auch die Lateralregelung mit realistischen Sensorsignalen als Eingangsgrößen untersucht. Ein Vergleich der simulierten Sensormodelle mit realen Sensordaten kann zu diesem Zeitpunkt noch nicht erfolgen, da noch keine Hardware zur Verfügung steht.

Validierung:

Eine Validierung ist wegen des Nicht-Vorhandenseins des physikalischen Aufbaus des Prüfstands im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls nicht möglich.

3.2 Erstellung der Co-Simulationsarchitektur

Um die Vorteile der Mehrkörpersimulation und der signalorientierten Simulation zu kombinieren, wird eine Co-Simulationsumgebung des NGT-FuN Prüfstands aus der Mehrkörpersimulation in Simpack und eines RCP-Systems (Signalverarbeitung) in Matlab/Simulink aufgebaut.

Bei den vorliegenden Modellen für die Mehrkörpersimulation und des RCP-Systems handelt es sich um, in ihrer Komplexität auf für diese Arbeit wichtigsten Funktionen beschränkte, Versionen.

Um die beiden Simulationsumgebungen in Simulink und Simpack zu verbinden, wird auf der Simpack-Seite ein Co-Simulation Command-Server aktiviert, welcher über eine Simat-Schnittstelle eine Verbindung mit einem Simat-Block in Simulink herstellt.

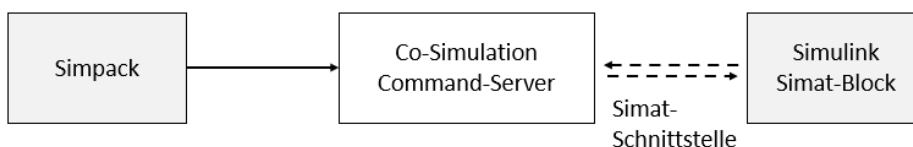


Abbildung 33 Simat-Schnittstelle

Ist diese Verbindung aktiv, so kann auf der Simulink-Seite die Co-Simulation gesteuert werden. Die mechanischen Komponenten des Systems sind in der Mehrkörpersimulation (Simpack) modelliert. Dessen Solver berechnen die Zustände des mechanischen Systems (Drehzahl der Räder, Position der mechanischen Komponenten, Kräfte etc.). Virtuelle Sensoren „messen“ die Sensorgrößen und geben ideale physikalische Signale aus. Die MKS ist als ein Simat-Block im Signalverlauf in Simulink eingefügt und kann wie eine Black-Box mit Eingangssignalen und Ausgangssignalen angesehen werden (siehe Abbildung 34). Die Eingangssignale für die MKS sind in dieser Version der MKS die Motormomente der Motoren, welche die Lateralregelung als Stallgröße ausgibt. Die Ausgangssignale sind die Messsignale, welche die Sensorik erfassen soll.

Die für diese Arbeit verwendete Version des RCP-Systems (Signalverarbeitung) in Simulink schließt folgende Systemkomponenten ein:

- Sensorschnittstelle
- Eingangssignalberechnung für den Lateralregler
- Lateralregler
- Aktorik-Schnittstelle

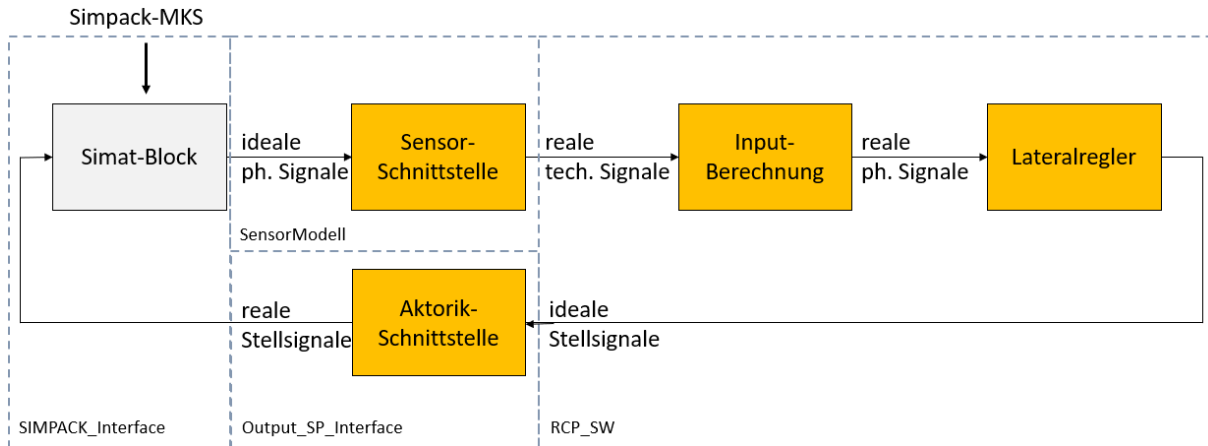


Abbildung 34 Grober Signalflussplan der Co-Simulation [orange: in Simulink implementiert, Grau: in Simpack implementiert]

SIMPACT_Interface:

Darin befindet sich der Simat-Block. Dieser ist die Schnittstelle von Simulink zu Simpack

SensorModell:

Durch den *SensorModell*-Block aus Abbildung 35 (der Sensorschnittstelle) werden aus den physikalischen Ausgangssignalen des Simat-Blocks und somit der Mehrkörpersimulation stör- und fehlerbehafteten technischen Signale berechnet. Diese realistischen technischen Signale gelangen in den *RCP_SW*-Block, welcher die Signalverarbeitung beinhaltet.

RCP_SW (Rapid-Control-Prototyping Software):

Innerhalb dieses Blocks werden die realen technischen Signale wieder in reale physikalische Signale umgerechnet. Anschließend gelangen diese Messsignale in den Lateralregler. Dieser verwendet sie, um die Stellgrößen für die Motoren zu berechnen, welche wieder die Eingangssignale für den Simat-Block und somit für die MKS sind. Ein geschlossener Regelkreis entsteht.

Output_SP_Interface:

Eine Aktorik-Schnittstelle hat die Aufgabe, die physikalischen Stellgrößensignale (Motormomente) in reale technische Eingangssignale für die Motoren umzuwandeln. Dabei werden die Eigenschaften, Störungen und Fehler der Motoren simuliert. Störungen und Fehler der Motoren werden in dieser Abschlussarbeit nicht modelliert. Die Struktur der Aktorik-Schnittstelle innerhalb der Simulationsumgebung ist allerdings erstellt worden und es kann zu einem späteren Zeitpunkt im Projektablauf ein Motormodell entwickelt werden, um den Detailgrad des Simulators noch weiter zu vertiefen.

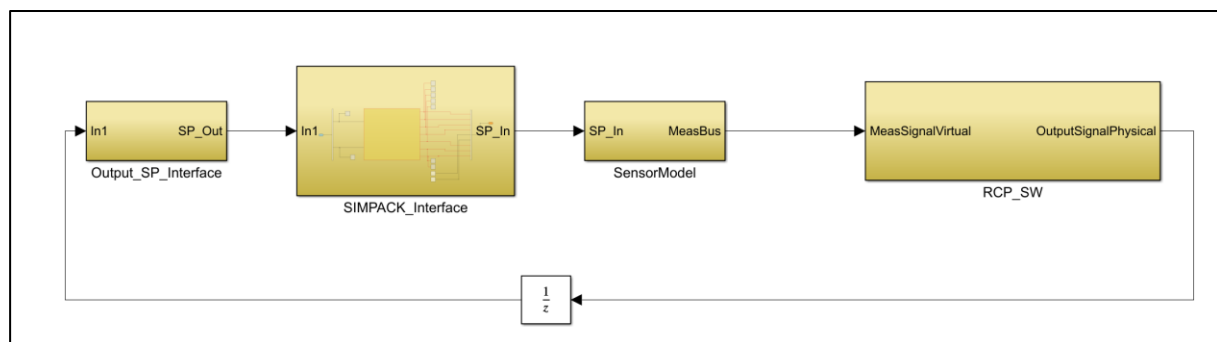


Abbildung 35 Co-Simulationsumgebung in Simulink

Die Anfangswertzustände der Co-Simulationsumgebung werden in den jeweiligen Simulationsumgebungen festgelegt. So sind beispielsweise die Startpositionen der mechanischen Komponenten und die Anfangsdrehzahlen der Räder bzw. der Rolle in der Mehrkörpersimulation in Simpack festgelegt. Die Initialwerte für den Lateralregler und der Sensorsimulation sind im Simulink-Modell hinterlegt.

3.2.1 NGT FuN Mehrkörpersimulationsmodell

Eine Simpack-Mehrkörpersimulation (MKS) des NGT FuN Prüfstandes mit allen relevanten mechanischen Komponenten existiert bereits und muss im Rahmen dieser Masterarbeit nicht entwickelt werden.

Abbildung 36 zeigt das Simpack-Modell des NGT-FuN Prüfstands:

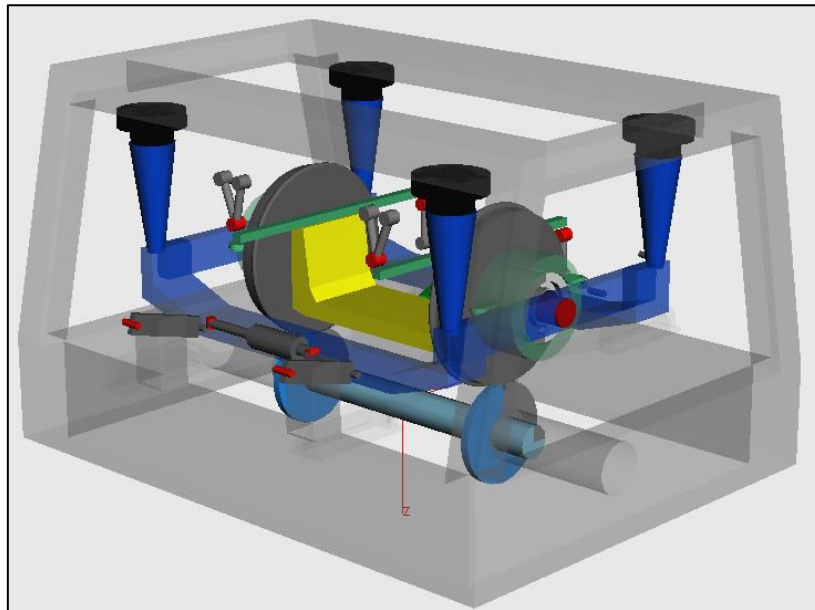


Abbildung 36 NGT-FuN Prüfstand (Simpack MKS)

Folgende Skizze veranschaulicht die mechanischen Komponenten aus Kapitel 2.5.2 und deren Verbindungen zueinander:

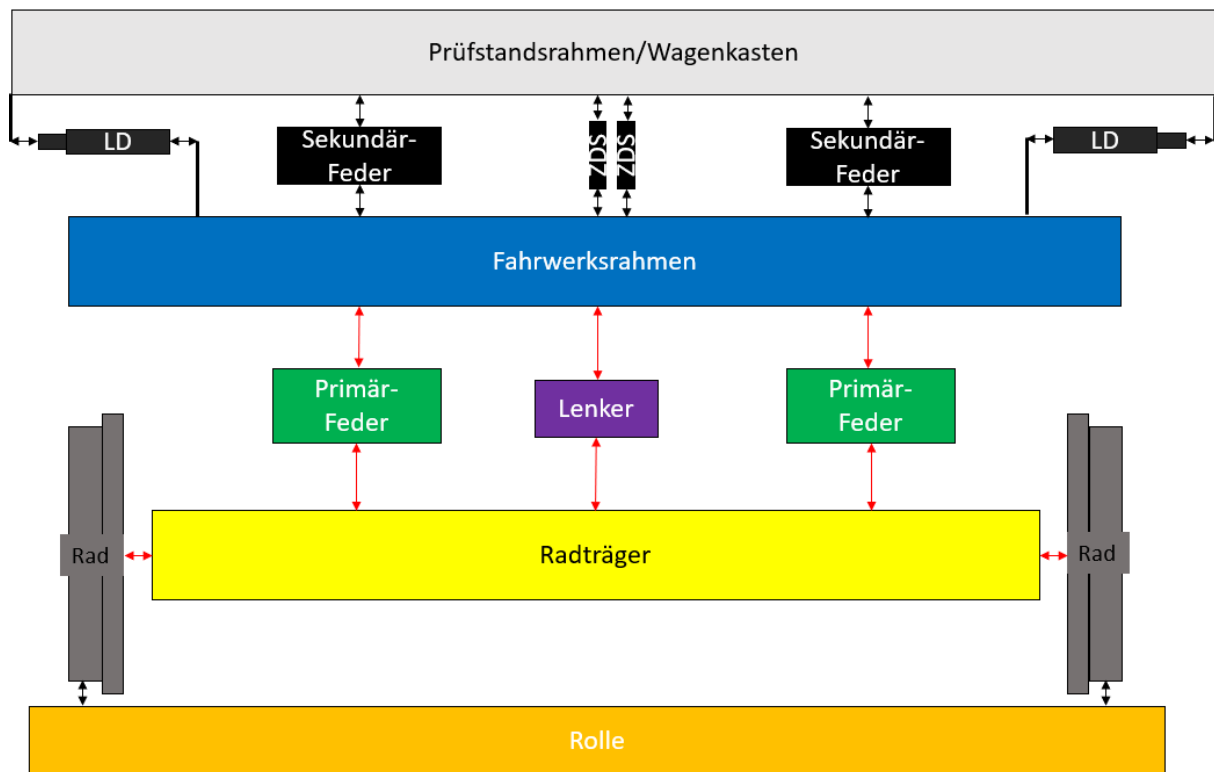


Abbildung 37 Überblick der Körper aus dem MKS. Die Doppelpfeile stellen Kraftbeziehungen zwischen den Körpern dar [rote Verbindungen: Gelenke/Lager, schwarze Verbindungen: Kraftelemente. ZDS: Zug-, Druckstange, LD: Lateraldämpfer]

Die einzelnen Komponenten des NGT-FuN sind als starre Körper modelliert und mit mechanischen Verbindungen zueinander versehen. Einige der Verbindungen sind Gelenke und Lager, welche ein oder mehrere Freiheitsgrade blockieren, andere bestehen aus virtuellen Kraftelementen, wie zum Beispiel der Kontakt zwischen Rolle und Rad.

3.2.2 Sensorik-Schnittstelle

In der Realität können physikalische Größen nur mit Sensoren gemessen werden. Die Mehrkörpersimulation in Simpack kann nur ideale physikalische Größen weitergeben. Weder die Mehrkörpersimulation noch die RCP-SW berücksichtigen die physikalischen und technischen Vorgänge innerhalb der Sensoren.

Um die Detailtiefe dieser Simulationsumgebung noch um die Sensorsimulation zu vergrößern, wird eine, in Simulink erstellte Sensorschnittstelle zwischen Mehrkörpersimulation und RCP-SW geschaltet (Abbildung 35). Aufgabe dieser Schnittstelle ist es die idealen physikalischen Signale, die aus der MKS kommen, in realistische technische Sensor-Ausgangssignale umzuwandeln, so wie die Software auch in der späteren Echtzeitumgebung die Sensorsignale erwarten würde. Die Nachbildung von Messtechnik und Sensorik ist notwendig für konsistente technische Sensorsignale als Eingänge für die RCP-SW in der Simulationsumgebung.

3.3 Sensorpositionen im NGT-FuN

Dieser Abschnitt beschreibt, wo sich die, in Kapitel 2.6 beschriebenen Sensoren innerhalb des NGT-FuN Prüfstands befinden. Dabei wird nur auf die Sensorpositionen eingegangen, die für diese Arbeit relevant sind. Um die Übersichtlichkeit dieser Arbeit zu bewahren, wurde auf die Beschreibung aller anderen Sensorpositionen verzichtet.

Es wird allgemein zwischen Funktionssensorik und Referenzsensorik unterschieden. Die Automatisierungstechnik im NGT-FuN Fahrwerk und im Prüfstand verwendet die Sensordaten der

Funktionssensorik. Die Referenzsensoren werden nur im Prüfstand eingesetzt. Diese geben Informationen über die Positionen der mechanischen Bauteile sowie die Kräfte und Momente, die an ihnen anliegen, um eine genauere Analyse des Systems zu gewährleisten. Diese Signale werden nicht für die Automatisierungstechnik genutzt.

3.3.1 Winkel/Drehzahlsensor

Eine wichtige Funktionssensorgruppe sind die Winkel- und Drehzahlsensoren im NGT-FuN. Durch die translatorische Relativbewegung des Schienenfahrzeugs über dem ortsfesten Fahrweg führen die Radsätze eines Schienenfahrzeugs eine charakteristische Drehbewegung aus. Der Winkel und die Winkelgeschwindigkeit der Räder werden mit Hilfe von Encoder gemessen. Beim NGT-FuN Prüfstand bewegen sich die Räder auf einer Rolle, welcher eine „unendliche“ gerade Schienenfahrt simuliert. Zusätzlich zu den Drehzahlen beider Räder wird auch die Rollendrehzahl mittels Encoder gemessen.

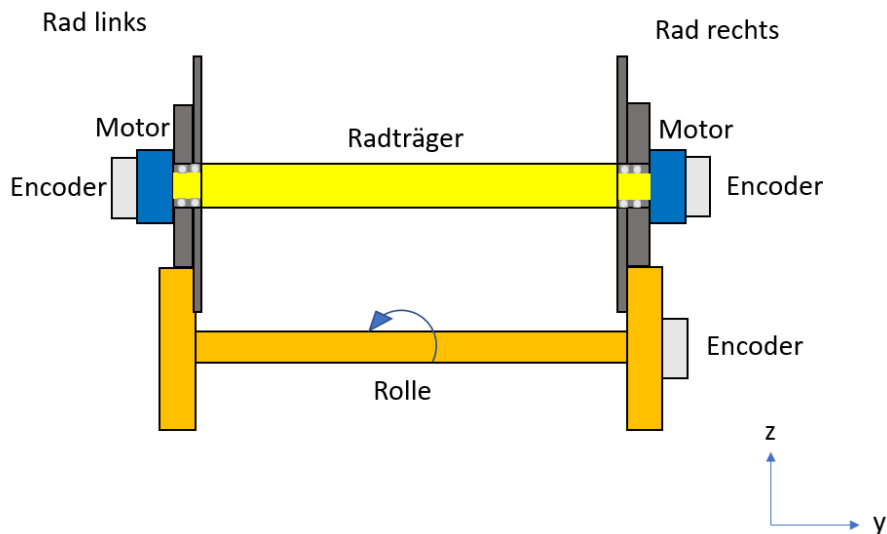


Abbildung 38 Skizze Rad-Rolle mit Encoder-Positionen

Die Encoder sind direkt an allen Radsätzen im NGT-Fahrwerk und an der Rolle befestigt. Zwischen Rad bzw. Rolle und Encoder ist keine Übersetzung geschaltet. Somit ist die Drehzahl der Schlitzscheibe im Encoder gleich der des Rades bzw. der Rolle.

3.3.2 Distanzsensoren

Distanzsensoren werden zur Abstandsmessung vom Prüfstandsrahmen, der Räder, der Rolle, des Radträgers, und des Fahrwerksrahmens relativ zueinander eingesetzt. Dabei wird zwischen Funktionssensorik und Referenzsensorik unterschieden. Die für die Automatisierungstechnik, zum Beispiel für den Lateralreger, wichtigen Sensoren bilden LVDT-Sensoren und Laser-Sensoren. Während in der Referenzsensorik nur Laser-Sensoren verwendet werden.

Funktions-Abstandssensorik im NGT-FuN:

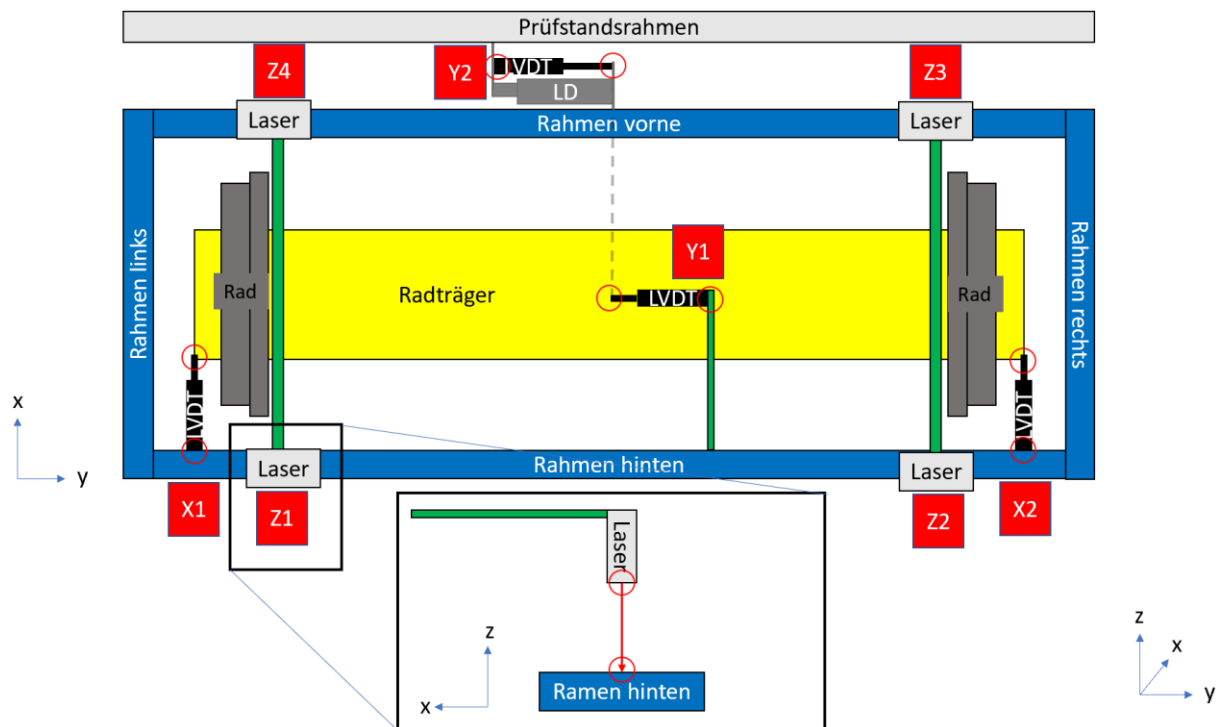


Abbildung 39 Sensorpositionen Funktions-Abstandssensoren in x, y und z Richtung (rote Kreise: Messpunkte)

Die in Abbildung 39 dargestellten Abstandssensoren gehören zur Funktionssensorik. Die Längsverschiebung (in x-Richtung) und gleichzeitig auch den Gier-Winkel messen zwei LVDT-Sensoren (X1, X2). Zwei weitere LVDT-Sensoren (Y1, Y2) messen außerdem noch die laterale Verschiebung des Radträgers gegenüber dem Fahrwerksrahmen und diesen gegenüber den Prüfstandsrahmen in y-Richtung. Vier Laser-Sensoren messen die vertikale Verschiebung in z-Richtung zwischen dem Radträger und dem Fahrwerksrahmen. Daraus kann auch die relative Nick- und Rollbewegung des Radträgers ermittelt werden.

Eine weitere Anwendung von Funktionsdistanzsensoren im NGT-FuN sind die Messungen von Dehnungen und Stauchungen von mechanischen Bauteilen, wie Feder und Dämpfer. Hierfür werden meist LVDT-Sensoren verwendet.

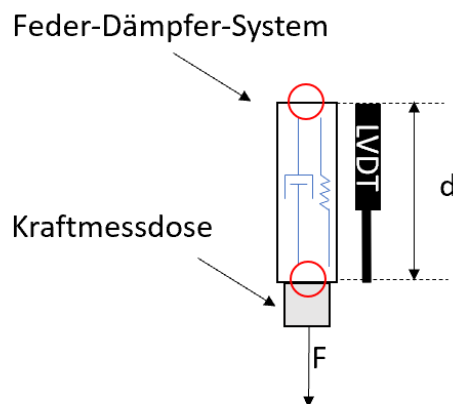


Abbildung 40 Kraft und Distanzmessung an Feder/Dämpfer (rote Kreise: Messpunkte)

Auch in der Referenzsensorik kommen Distanzsensoren zum Einsatz. LVDT-Sensoren sind nicht für winkelunabhängige Entfernungsmessungen von bewegten Objekten, von bestimmten

Referenzpositionen aus geeignet. Für solche Anwendungen werden im NGT-FuN Prüfstand Laser-Abstandssensoren verwendet. Bei der Referenzmessung des lateralen Versatzes von Rolle und Rad, ist dies der Fall (Abbildung 41). Die Distanz zwischen Prüfstandsrahmen und Rad/Rolle wird mittels Laser-Abstandssensoren, knapp über- und unterhalb vom Rad-Rolle-Kontaktes gemessen. Die Sensoren befinden sich ruhend an dem Prüfstandsrahmen, während die Räder und die Rolle sich drehen.

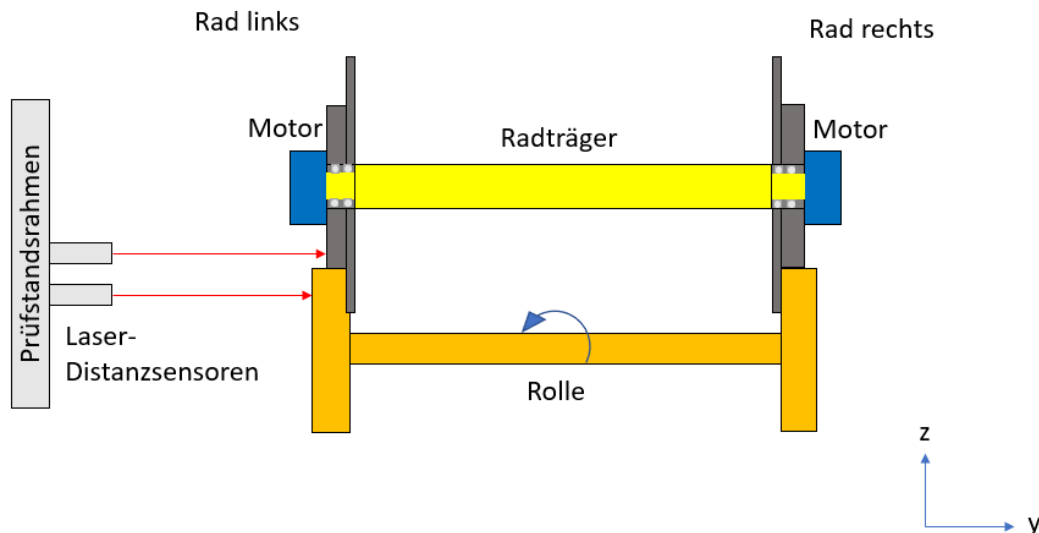


Abbildung 41 Laser-Distanzmessung zur Bestimmung des lateralen Versatzes zwischen Rad und Rolle

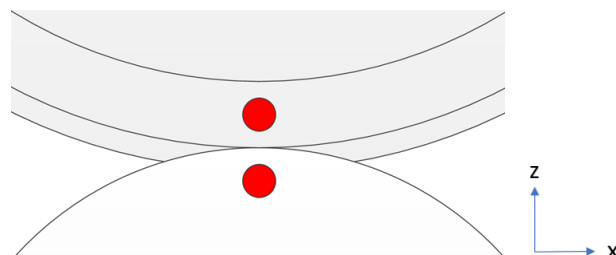


Abbildung 42 Lasersensorenpunkte an Rad und Rolle

Die Differenz aus den Abständen zwischen dem Prüfstandsrahmen und dem Rad bzw. der Rolle bildet den lateralen Versatz zwischen Rad und Rolle in y-Richtung.

3.3.3 Kraft- und Momentsensoren

Eine weitere Funktion der Referenzsensorik ist die Kraft- und Momentmessung. Kraftsensoren und Momentsensoren befinden sich an verschiedenen Stellen am NGT-FuN und sind für die Messung von Federkräften und Kräfte/Momente an Dämpfern und Stangen verantwortlich. Zusätzlich werden auch Kräfte und Momente an den Radlagern und Rollenlagern am Prüfstand gemessen.

Sensorposition Zug-Druck-Stangen:

Die Positionen der Zug-Druck-Stangen können Abbildung 16 entnommen werden. Diese befinden sich an der Vorderseite des Radträgers und verbinden diesen mit dem Wagenkasten bzw. mit dem Rahmen des Prüfstands. Da diese Stangen als starre Körper (unendliche Steifigkeit) im Simpack modelliert sind, ist keine Distanzmessung notwendig. Diese Stangen sind mit Kugelgelenken an ihren Enden gefestigt, sodass nur eine Zug- bzw. Druckkraft abgeleitet werden kann.

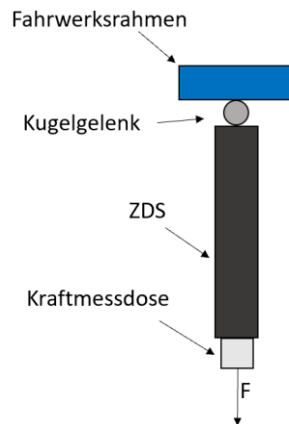


Abbildung 43 Messung der Kraft an einer Zug-Druck-Stange (ZDS) (vom Radträger freigeschnitten)

Gemessen wird die Kraft an jeder Stange mittels Kraftmessdosen mit DMS-Technologie.

An einigen Positionen, wie an den Sekundärfedern, werden 2x 3D-Messdosen (HBM MCS10 50kN) verwendet, welche nicht bloß eine Kraft messen, sondern die Kräfte und Momente entlang allen drei Raumachsen gleichzeitig.

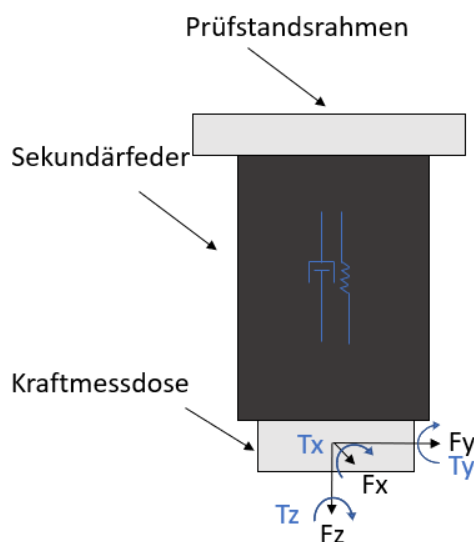


Abbildung 44 Kraft/Momentenmessung an einer Sekundärfeder (vom Fahrwerksrahmen freigeschnitten)

Diese Sensoren erzeugen 6 Ausgangssignale (F_x , F_y , F_z , T_x , T_y und T_z).

3.4 Anforderungen an die Sensorschnittstelle

Aus den, in Abschnitt 3.2.2, genannten Aufgaben werden folgende Anforderungen an die Sensormodelle abgeleitet:

- Umwandlung idealer physikalischer Größen (aus Simpack) in möglichst reale technische Signale
- Parametrisierbare und konfigurierbare Modellbibliotheken
- Systematische Modelstruktur mit Physik- Störung- und Fehlermodell

Da die Auswahl der Sensorik nicht vollständig abgeschlossen ist, müssen die Sensormodelle möglichst unspezifisch aufbaut sein. Durch eine Liste von Parametern und Konfigurationen, sollen verschiedene Sensoren der gleichen Technologie modelliert werden können. Dazu sollen Parameter

von den technischen Beschreibungen der einzelnen Sensoren eingelesen werden können. Auch der Detailgrad des Modells soll immer weiter vertieft werden können. Somit ist eine systematische Modellstruktur erforderlich. Es wird zwischen Sensormodellierung der Physik und der Technik unterschieden. Außerdem erfolgt eine Trennung zwischen idealem Sensorverhalten, den Störungen und den Fehlern, die auf das Messsignal wirken. Welche Eigenschaften der Sensoren sowie der Stör- und Fehlerphänomene die Modelle abdecken sollen, ist in Mind-Maps, welche für jedes Sensormodell erstellt wurden, festgelegt. Diese Mind-Maps sind dem Anhang III zu entnehmen.

3.5 Generische Modellstruktur für die Sensorsimulation

Alle Sensormodelle können durch eine generische Struktur abgebildet werden. Vorteile einer einheitlichen Sensorstruktur sind:

- Übersichtlichkeit im Gesamtmodell
- Einfachere Erweiterbarkeit und Vertiefbarkeit
- Modellbildung neuer Sensortechnologien analog zu alten Modellen realisierbar

Um eine systematische und übersichtliche Sensormodell-Struktur zu gewährleisten, ist die Unterteilung eines Sensormodells in mehrere Untermodelle notwendig.

Ein Sensormodell wird in folgender Struktur aufgeteilt: [40, 109f]

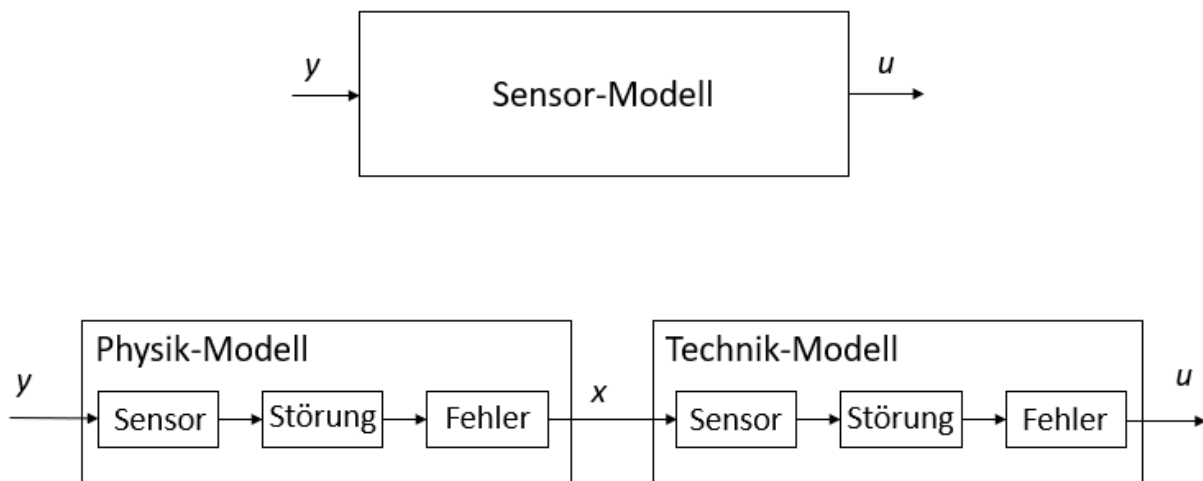


Abbildung 45: Struktur eines Sensormodells y : Messgröße, u : technische Sensor-Ausgangsgröße, x : Zwischengröße [40, S. 109]

Die meisten Sensoren messen die Messgröße indirekt, indem sie diese erst in eine andere physikalische Größe umwandeln. Die Zwischengröße x bezeichnet hier die letzte physikalische Größe vor der Umwandlung in die technische Größe u (zum Beispiel die Dehnung des Federkörpers bei einer Kraftmessung mit einem DMS-basierten Kraftsensor).

Eigenschaften:

- Strikte Trennung zwischen Physikmodell und Technikmodell
- Strukturierter und übersichtlicher Aufbau der Umgebung in Matlab/Simulink
- Strukturierung in Sensor-, Stör- und Fehlermodell
- Das Sensormodell beschreibt das ideale Verhalten des Sensors
- Das Störungsmodell prägt Störungen auf wie Messabweichungen oder Rauschen etc.
- Das Fehlermodell modelliert Fehlfunktionen oder einen Ausfall des Sensors.

Die Sensorschnittstelle wurde in Matlab/Simulink programmiert. Submodelle bilden die Sensor-Physik bis Technik-Fehlermodelle. Folgender Signalflussplan zeigt die generische Anordnung der Submodelle innerhalb des Physikmodells eines Sensors mit Indizes, die in der Implementierung für die Signale Verwendung finden:

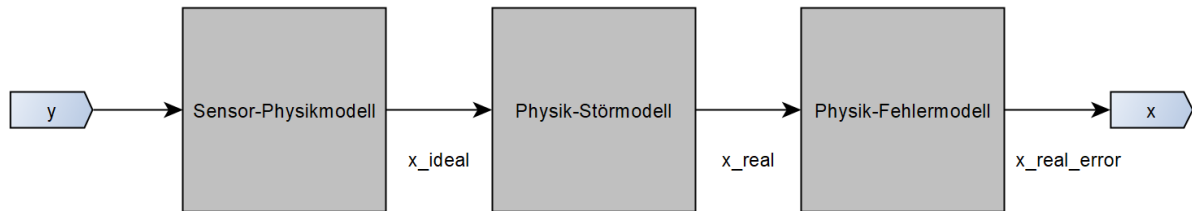


Abbildung 46 Signalflussplan Sensor-Physikmodell y: Messgröße x: Sensorgröße

Indizes:

Index:	Bedeutung
_ideal	Ideal umgerechnetes Signal
_real	Realistisches Signal mit allen Störungen/Abweichungen zu dem idealen Signal
_error	Fehlerbehaftetes Signal

Tabelle 1 Indizes der Signale innerhalb der Sensormodell-Struktur

Diese Struktur wird auch im Sensor-Technikmodell angewandt.

Im Folgenden werden die Elemente der Modellstruktur beschrieben:

Sensor-Physikmodell:

In diesem Modell werden die, aus der Mehrkörpersimulation berechneten, idealen physikalischen Eigenschaften in die idealen physikalischen Messgrößen des Sensors gewandelt, so wie der Sensor es in seiner Einbaulage aufnimmt. Es können auch mehrere physikalische Größen zusammengefasst werden.

Sensor-Störmodell:

Störungen werden in Form von systematischen und zufälligen Abweichungen dem physikalischen Sensorsignal aufgeprägt. Dies ist durch Modellierung von bekannten physikalisch beschreibbaren Störeinflüssen möglich oder kann eine rein funktionale Beschreibung von Störeeigenschaften sein. Oftmals wird ein additives Zufallssignal überlagert, um so ein Rauschen zu simulieren.

Physik-Fehlermodell:

Alle Sensoren können nach einem Fehler (mit einer Fehlerfunktion) ausfallen. Den erkannten Ausfallszenarien des Sensors werden Fehlerbilder zugeordnet, die wertbasierte und zeitbasierte Eigenschaften haben. So kann ein Sensorsignal in einem Fehlerbild bestimmte Werte annehmen und diese mit einem charakteristischen Zeitverhalten ändern.

- Wertebasiert: Null, konstanter Wert, Rauschen, Steigungs- und/oder Offset-Fehler
- Zeitbasiert: einzeln, sporadisch, periodisch, kontinuierlich

Technik-Physikmodell:

In dieser Funktion wird die gemessene und vom Sensor verarbeitete physikalische Eigenschaft in die am Sensorausgang technisch anliegende Messgröße gewandelt. Für analoge Spannungsschnittstellen liegt ein zeitlich kontinuierliches elektrisches Signal an. Die charakteristische Frequenz von Sinussignalen oder digitalen Signalen wird in der Einheit Herz (Hz) angegeben.

Technik-Störmodell:

Analoge Signale werden meist mit einem Offset und einem Messrauschen beeinflusst. Ein zeitlicher Versatz muss berücksichtigt werden, wenn sie gefiltert wurden.

Da sich die messbaren Signale nur in einem diskreten zeitlichen Raster ändern, wird auch das simulierte Messsignal in diesem Modell diskretisiert.

Technik-Fehlermodell:

In diesem Modell werden den gestörten technischen Signalen mögliche Fehlerzustände aufgeprägt. Funktional entspricht dieses Modell dem Physik-Fehlermodell. Dieses kann als ein Zufallsereignis modelliert werden oder als ein manueller Trigger. Die zweite Variante ermöglicht gezielt die Auswirkungen dieses Fehlers, explizit zu simulieren. Auch ein technischer Ausfall des Sensors kann simuliert werden. Fällt ein Sensor aus, sendet dieser eines der folgende Ausgangssignale [40, S. 109-111]:

- Konstantes Rauschen
- Kontinuierlich einen Wert von 0
- Kontinuierlich einen festen Wert
- Ein Steigungs- und/oder Offset-Fehler

3.6 Sensormodell: Winkel- und Drehzahl-Sensorik

Zur Erfassung der Rad- und Rollenumfangsgeschwindigkeit im NGT-FuN werden Encoder eingesetzt. Diese sind axial an den Rädern und an der Rolle angebracht. Dessen technische Funktionsweise wurde im Kapitel 2.6.2 beschrieben.

Folgende Phänomene werden im Encoder-Sensormodell implementiert. Dabei wird die Strukturierung aus Abbildung 46 angewandt:

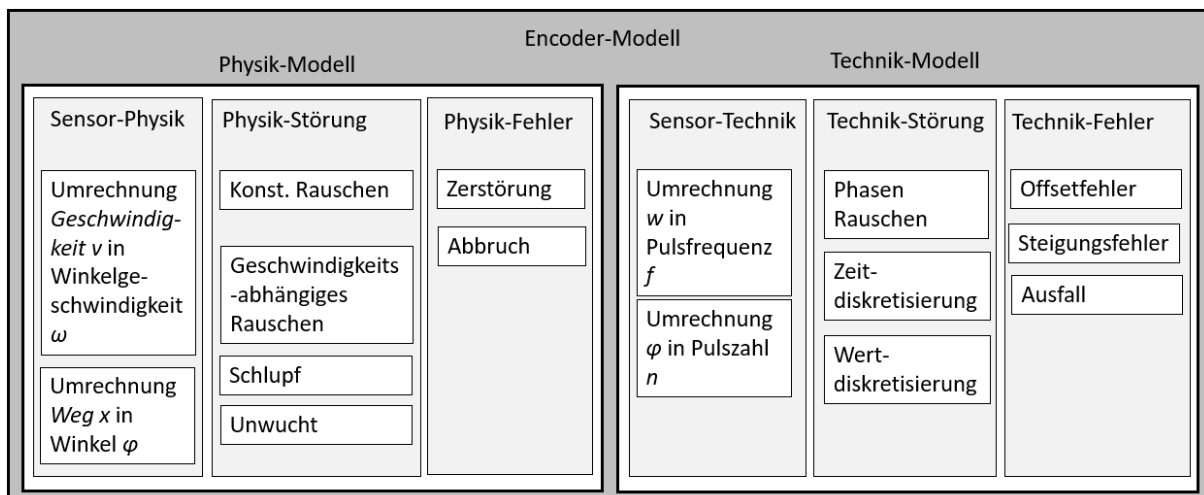


Abbildung 47 Funktionsübersicht Encodermodell

Folgender Signalflussplan stellt die einzelnen Submodelle mit Signalbezeichnungen für das Encodermodell dar.

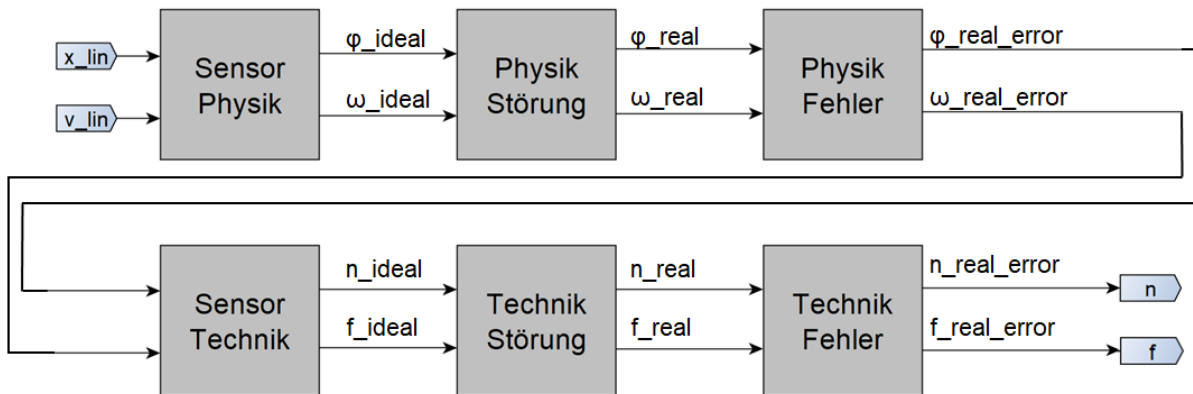


Abbildung 48 Signalflussplan Encodermodell

3.6.1 Sensor-Physikmodell

Das Physik-Modell des Encoders ist lediglich durch die ideale Umrechnung von der Fahrtgeschwindigkeit des Zuges v und des Fahrtwegs x in die Winkelgeschwindigkeit ω und den laufenden Winkel φ des Rades beschrieben. Diese Größen bilden das rotationsmechanische Pendant zu der translatorischen Geschwindigkeit und dem Weg.

$$\omega = \frac{v}{r_{wheel}}$$

Formel 5 Umrechnung von Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs in Winkelgeschwindigkeit Rad/Schlitzscheibe [ω : Winkelgeschwindigkeit in rad/s, v : Fahrtgeschwindigkeit Zug, r_{wheel} : Radius Rad in m]

3.6.2 Physik-Störmodell

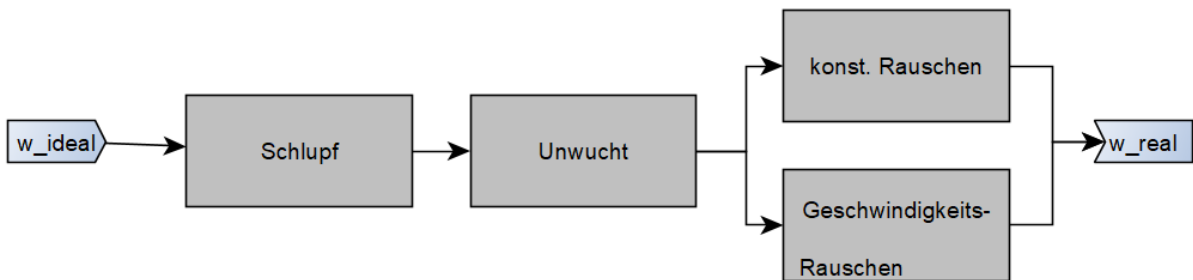


Abbildung 49 Physik-Stör-Submodelle

Schlupf:

Der in Kapitel 2.4.4 beschriebene Schlupf zwischen Rad und Schiene muss sich auch im Sensormodell wiederfinden. Dazu wurden verschiedene Einflüsse, welche einen solchen Schlupf verursachen im Störmodell zusammengefasst. Es wurde sich für einen Fahrzeugbeschleunigungsabhängigen Längsschlupf nach Schindler entschieden. [15, 33f]

Dieser ist folgendermaßen definiert:

Radumfangsgeschwindigkeit:

$$u_{wheel} = \omega * r_{wheel}$$

Formel 6 Berechnung Radumfangsgeschwindigkeit u_{wheel} in m/s [ω : Winkelgeschwindigkeit in rad/s, r_{wheel} : Radradius in m]

Längsgleitgeschwindigkeit:

$$\omega = v - u_{wheel}$$

Formel 7 Berechnung Längsgleitgeschwindigkeit ω [v : Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s, u_{wheel} : Radumfangsgeschwindigkeit in m/s]

Für die Schlupfbehafteten Rotationsgeschwindigkeiten gilt für:

Triebfahrt ($a > 0$):

$$\Delta\omega_{slip_tf} = \omega_{ideal} * (1 - S_x)$$

Formel 8 Berechnung Schlupf bei Triebfahrt $\Delta\omega_{slip_tf}$ [ω_{ideal} : Winkelgeschwindigkeit in rad/s (nicht schlupfbehaftet), S_x : Längsschlupf]

Bremsfahrt ($a < 0$):

$$\Delta\omega_{slip_bf} = \frac{\omega_{ideal}}{(1 - S_x)}$$

Formel 9 Berechnung Schlupf bei Bremsfahrt $\Delta\omega_{slip_bf}$ [ω_{ideal} : Winkelgeschwindigkeit in rad/s (nicht schlupfbehaftet), S_x : Längsschlupf]

Der Längsschlupf S_x wird vereinfacht als linear abhängig von der Fahrzeugbeschleunigung angenommen:

$$S_x = -S_{const} * a \text{ mit } S_{const} = 0..1$$

Formel 10 Berechnung Längsschlupf S_x [S_{const} : Schlupfkonstante, a : Fahrzeugbeschleunigung]

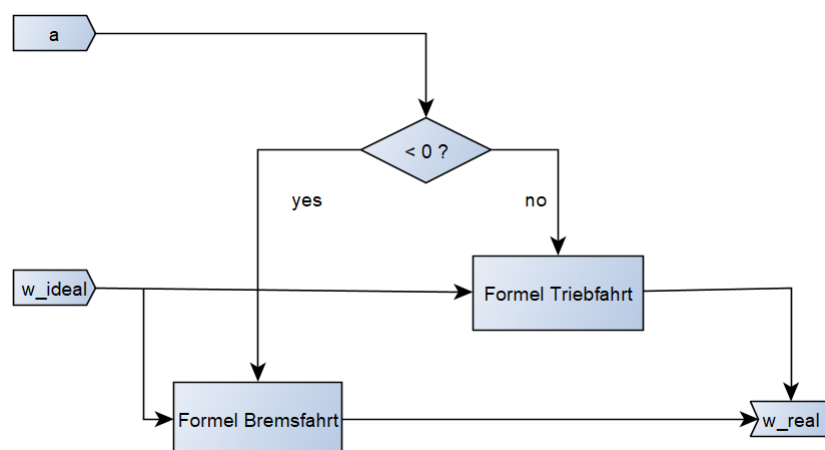


Abbildung 50 Implementierung Schlupf

Für die Implementierung des Schlupfes ist die Information der Beschleunigung notwendig. Diese wird in der Co-Simulationsumgebung von der Simpack-Mehrkörpersimulation geliefert.

Im Folgenden wird eine Simulation mit plakativen Störparametern durchgeführt anhand dessen, der Schlupf veranschaulicht wird.

Simulationsparameter:

Fahrtgeschwindigkeit v	16 m/s
Fahrtzeit t	40 s
Radius Rad r_{wheel}	0.452 m
Encoder-Zähnezahl m_z	1000
Duty-Cicle der Pulse	50%
Interne Clock-frequenz der Encoder-Karte f_z	10 MHz

Tabelle 2 Simulationsparameter Encodermodell

Die Sensorsimulation für den Encoder sieht dann wie Folgt aus:

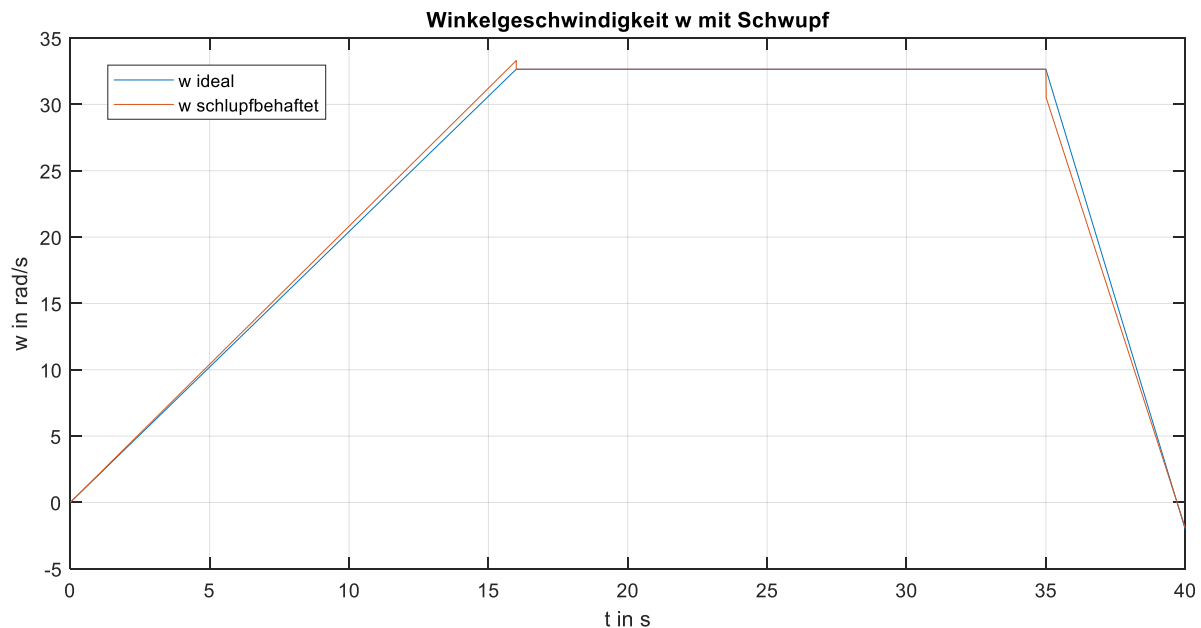


Abbildung 51 Winkelgeschwindigkeit mit Schlupf (plakative Darstellung)

Der Zug fährt bei $t=0s$ mit konstanter Beschleunigung los und erreicht nach 17 Sekunden seine maximale Geschwindigkeit von 33 m/s. Nach weiteren 17 Sekunden bremst er konstant ab. Die letzten 5 Sekunden fährt er rückwärts. Die Schlupfkonstante S_x wurde hier auf einen unrealistisch hohen Wert gesetzt, um dessen Effekt besser sichtbar zu machen.

Rauschen:

Durch Erschütterungen und Schwanken in der Drehzahl der Räder, verursacht beispielsweise durch Unebenheiten oder Dreck/Laub auf den Schienen, wird das Ausgangssignal des Encoders zusätzlich zum Schlupf gestört. Zu beobachten ist das anhand von Amplitudenrauschen und Phasen-Jitter im Winkelgeschwindigkeitssignal. In der Simulation muss dies ersichtlich sein. Somit wird dem Winkelgeschwindigkeitssignal ein Rauschsignal drauf addiert. Um das Phasen-Jittering zu realisieren, geschieht dasselbe mit dem Winkelsignal. Zwei Rauschkomponenten werden implementiert. Ein konstantes Rauschen und eines, das mit der Geschwindigkeit des Zuges in seiner Amplitude zunimmt. Im Modell wird einfachheitshalber von einer linearen Abhängigkeit der Geschwindigkeit ausgegangen und beide Rauschsignale als ein weißes Rauschen simuliert.

Unwucht:

Sind das Rad und die Schlitzscheibe des Encoders nicht zu 100% genau an ihren Mittelpunktsachsen bzw. Schwerpunktsachsen verbunden, kommt es während der Drehung zu einer Unwucht. Dies macht sich als eine periodische Abweichung in der Drehzahlmessung bemerkbar.

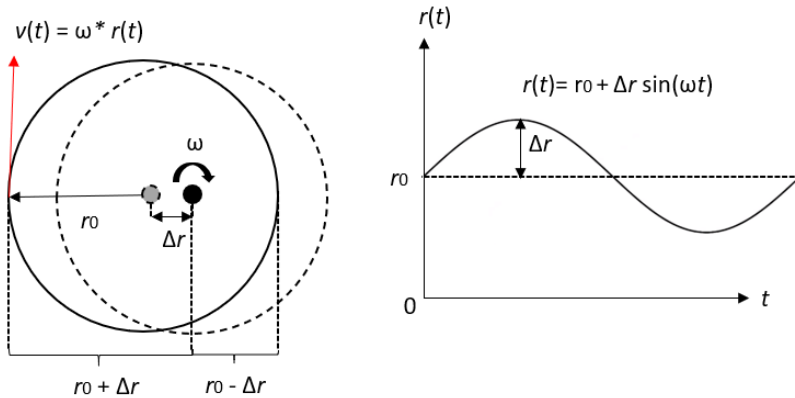


Abbildung 52 Skizze Unwucht [r_0 : Radius Schlitzscheibe, Δr : Abweichung Mittelpunkt-Drehachse der Schlitzscheibe, $v(t)$: Umfangsgeschwindigkeit am Rand der Schlitzscheibe]

Für die Winkelmessung mit dem Encoder ist die Umfangsgeschwindigkeit am Rand der Schlitzscheibe entscheidend. Diese ist das Produkt aus der realen Drehzahl und dem Radius, welche sich durch die Unwucht sinusförmig verändert.

$$v(t) = \omega(r_0 + \Delta r \sin(\omega t))$$

Formel 11 Umfangsgeschwindigkeit am Rand der Schlitzscheibe bei Unwucht

Da die Messgröße ω ist, wird, muss Formel 11 noch durch den idealen Radius r_0 geteilt werden.

$$\omega(t) = \underbrace{\omega}_{\omega_{ideal}} + \underbrace{\omega \frac{\Delta r}{r_0} \sin(\omega t)}_{\Delta \omega}$$

Formel 12 Berechnung Abweichung verursacht durch die Unwucht [ω : ideale Drehzahl, $\Delta \omega$: Drehzahlabweichung durch Unwucht]

Modelliert wird dies durch eine sinusförmige Abweichung, die auf ω aufaddiert wird. Die Periodendauer der Abweichung stimmt genau mit der Umlaufdauer des Rades überein. Dessen Amplitude ist abhängig, wie weit die Schwerpunktsachsen der Schlitzscheibe und des Rads voneinander entfernt sind (Δr) und abhängig von der Winkelgeschwindigkeit selbst.

3.6.3 Physik-Fehlermodell

Nicht implementiert

3.6.4 Sensor-Technikmodell

Im Technikmodell wird das stör- und fehlerbehaftete physikalische Signal der Winkelgeschwindigkeit in die technische Größe „Frequenz der Lichtpulse“ f umgerechnet. Der fortlaufende Winkel φ wird in „Anzahl der Pulse“ n umgerechnet. Ab diesem Zeitpunkt wird nur noch mit den technischen Größen gerechnet. Im Technikmodell wird der technische Aufbau des Sensors genauer betrachtet.

$$f = \frac{\omega}{2\pi} * m_z$$

Formel 13 Umrechnung Winkelgeschwindigkeit in Pulsfrequenz [f : Pulsfrequenz, ω : Winkelgeschwindigkeit, m_z : Zähnezahl]

Der vorliegende Encoder besitzt drei Kanäle, zwei mit je m_z Zähne, die jeweils um 90° Phasenverschoben sind und ein Index-Kanal, der nur einen Puls pro Umdrehung registriert.

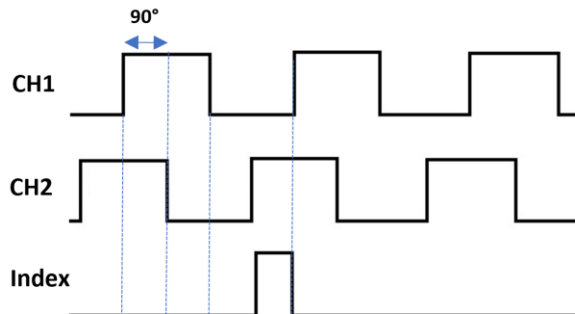


Abbildung 53 Signale eines Quadraturencoders

In diesem Submodell werden für diese drei Kanäle drei separate n 's erzeugt. Ein ganzes n ist definiert als der Abstand zwischen zwei aufsteigenden Flanken von einem Kanal. Somit gelten für absteigende Flanken von Kanal 1 und beide Flanken von Kanal 2 folgende Phasenverschiebungen:

Flanke	Δn	Phasenverschiebung
Kanal 1 auf	0	0°
Kanal 2 auf	0.25	90°
Kanal 1 ab	0.5	180°
Kanal 2 ab	0.75	270°

Tabelle 3 Phasenverschiebungen von n bei verschiedenen Flanken

Für den Index-Kanal wird nur ein Puls pro Umdrehung definiert. Dieser erfolgt bei einer Winkellage von 0° . Die Angaben auf Tabelle 3 gelten für einen Duty-Cycle von 50%, also wenn Lichtpulse und Schattenpulse, erzeugt von der Schlitzscheibe, genau die gleichen Längen besitzen. In einem Parameter in dem Modell ist es möglich den Duty-Cycle einzustellen und so auch andere Phasenverschiebungen zu ermöglichen.

Ob und wie viele dieser zusätzlichen Flanken genutzt werden, ist ebenfalls im Sensormodell parametrisiert. Es sind dafür folgende Optionen dazu implementiert.

Auswertung	Kanal 1 aufsteigende Flanke	Kanal 2 aufsteigende Flanke	Kanal 1 absteigende Flanke	Kanal 2 absteigende Flanke
1 Kanal	X			
2 Kanal	X		x	
Quadratur	X	x	x	x

Tabelle 4 Verwendung der Flanken bei verschiedenen Auswertoptionen

3.6.5 Technik-Störmodell



Abbildung 54 Technik-Stör-Submodelle

Nachdem die physikalischen Signale in ideale und Zeit- und Wertkontinuierliche technische Signale umgewandelt wurden, wird hier das Augenmerk auf die realistische Funktionsweise des Encoders gelegt.

Die Frequenz der Rechteck-Pulse auf der Encoderscheibe wird elektrisch an eine Signalverarbeitungseinheit gesendet. Dabei wird die Zeit gemessen, welche zwischen zwei aufsteigenden Flanken vergeht und daraus die Pulsfrequenz f berechnet. Diese Frequenz wird erst wertkontinuierlich, aber zeitdiskret modelliert, da der Wert von f nur zu diskreten Zeitpunkten aktualisiert wird (Immer, wenn eine neue Flanke erkannt wird).

Zeitdiskretisierung:

Ein Trigger-Signal, welches immer dann ausschlägt, wenn ein Inkrement erkannt wird (Aufsteigende oder fallende Flanke oder Beides) setzt den Zeitpunkt fest, an den ein neuer Wert für f und n gespeichert werden soll.

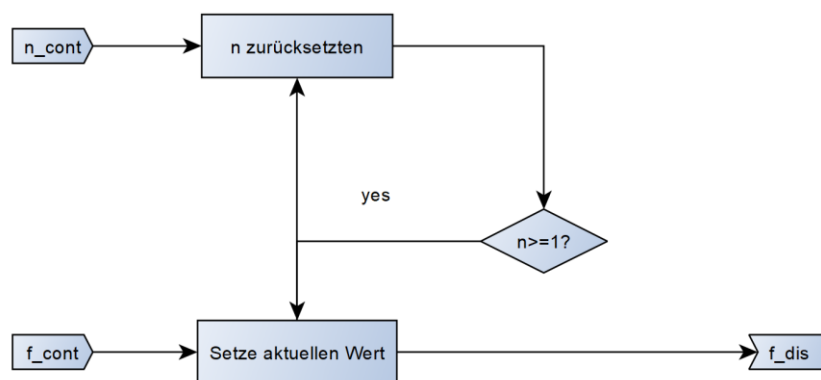


Abbildung 55 Flussdiagramm Diskretisierung nach ganze n (stark vereinfacht)

Das kontinuierliche Signal n_cont wird aufsteigend gezählt. Erreicht es den Wert 1 ist eine Flanke erkannt worden (Trigger wird gesetzt) und der aktuelle Wert von f wird gespeichert. Anschließend wird die Zählung von n_cont zurück auf 0 gesetzt und ein neuer Trigger wird erst dann gesetzt, wenn n_cont wieder 1 erreicht.

Folgende Abbildung zeigt das kontinuierliche Signal von n_cont , dass zum Triggern der Inkrement-Zeitpunkte genutzt wird:

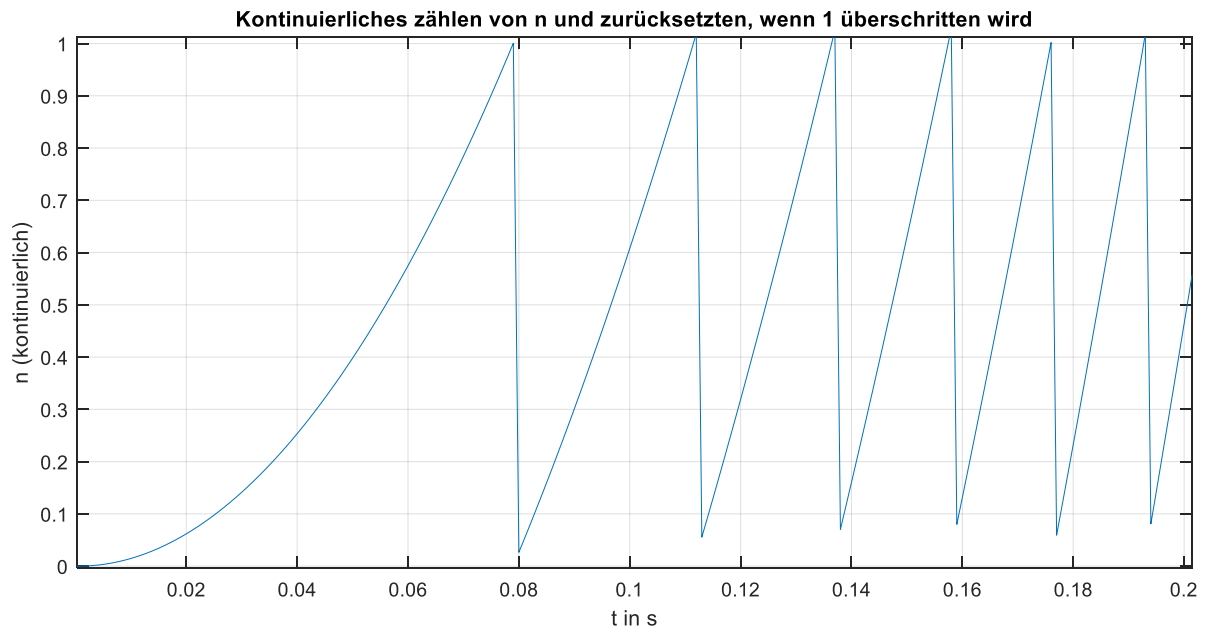


Abbildung 56 Flankenanzahl n über die Zeit. überschreitet n die 1, wird ein Trigger gesetzt und n wieder auf null zurückgesetzt

Das dazugehörige Signal für f sieht folgendermaßen aus:

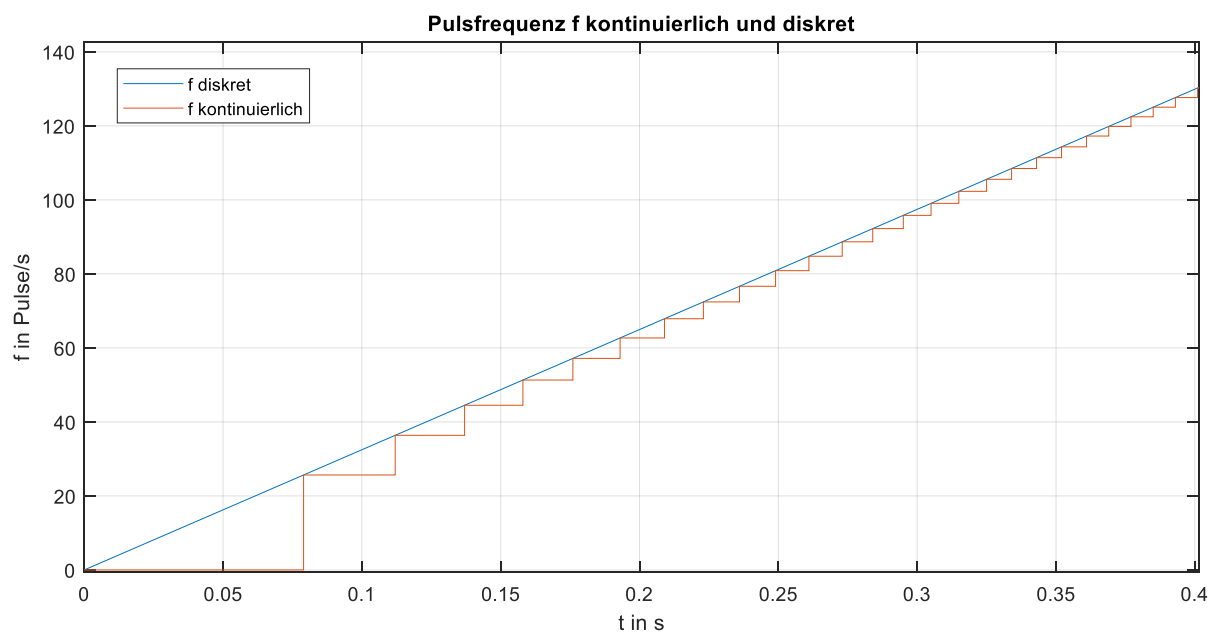


Abbildung 57 Pulsfrequenz bei einem 1-Kanal-Encoder

Gut zu erkennen ist, dass der Abstand der Inkremente (Trigger) mit einer höheren Drehzahl abnimmt und die Auflösung des Encoders zunimmt. Sind mehrere Flanken in Benutzung, erhöht sich ebenfalls die Auslösung des Sensors. Folgender Plot zeigt denselben Zeitausschnitt wie oben nur bei einem Quadratur-Encoder:

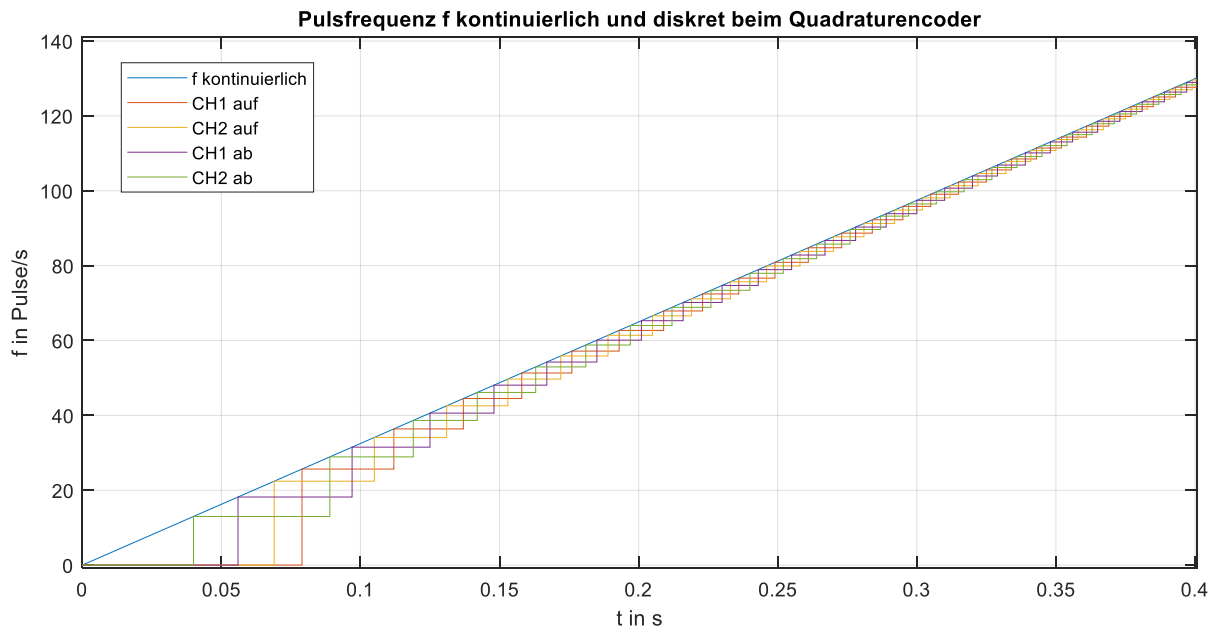


Abbildung 58 Pulsfrequenz bei einem Quadratur-Encoder (aufsteigende und absteigende Flanken beider Kanäle sind in Verwendung)

Reale Messanordnungen bestimmen die Pulsfrequenz aus nur dem zeitlichen Abstand zwischen 2 Flanken (der aktuellen Flanke zum Triggerzeitpunkt und der letzten Flanke). Dadurch entsteht eine zeitliche Mittelung der Frequenzen zwischen den Flankenzeitpunkten. Dieses Verhalten zeigt sich durch eine Verzögerung des diskreten Signals von f . In der Modellierung wird der aktuelle Wert von f mit dem vergangenen Wert gemittelt. Dadurch erhält man das Signal f mit Verzögerung in Abbildung 59.

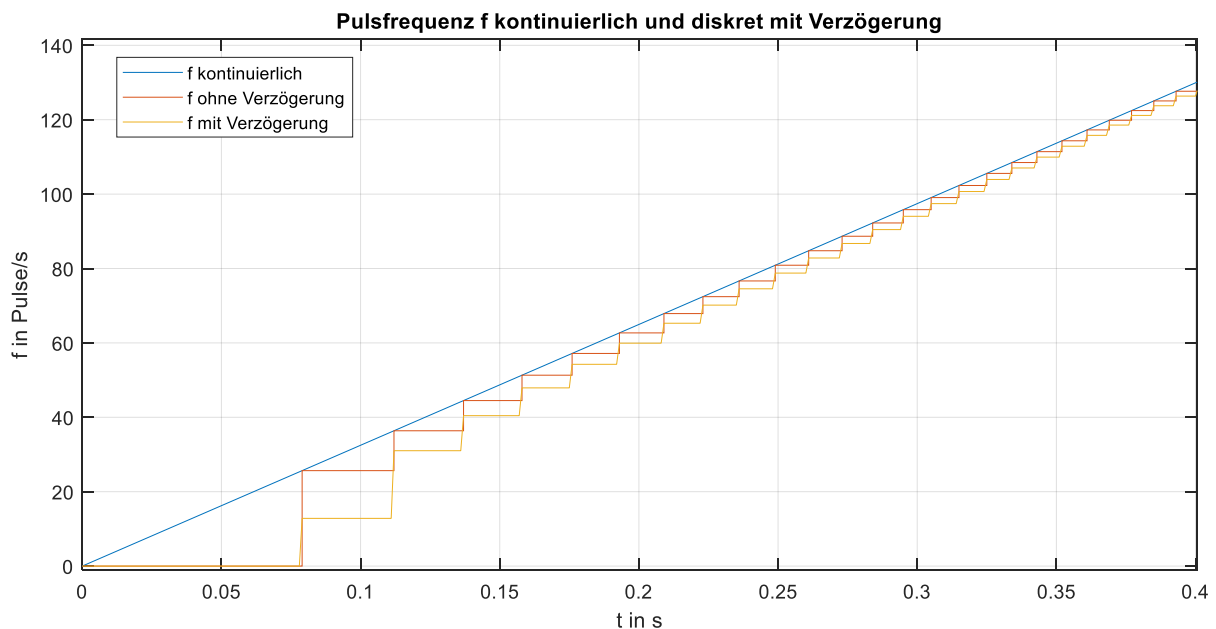


Abbildung 59 Pulsfrequenz kontinuierlich diskret und mit Verzögerung

Dieser nichtlineare Störeffekt ist vor allem bei kleinen Geschwindigkeiten sehr präsent.

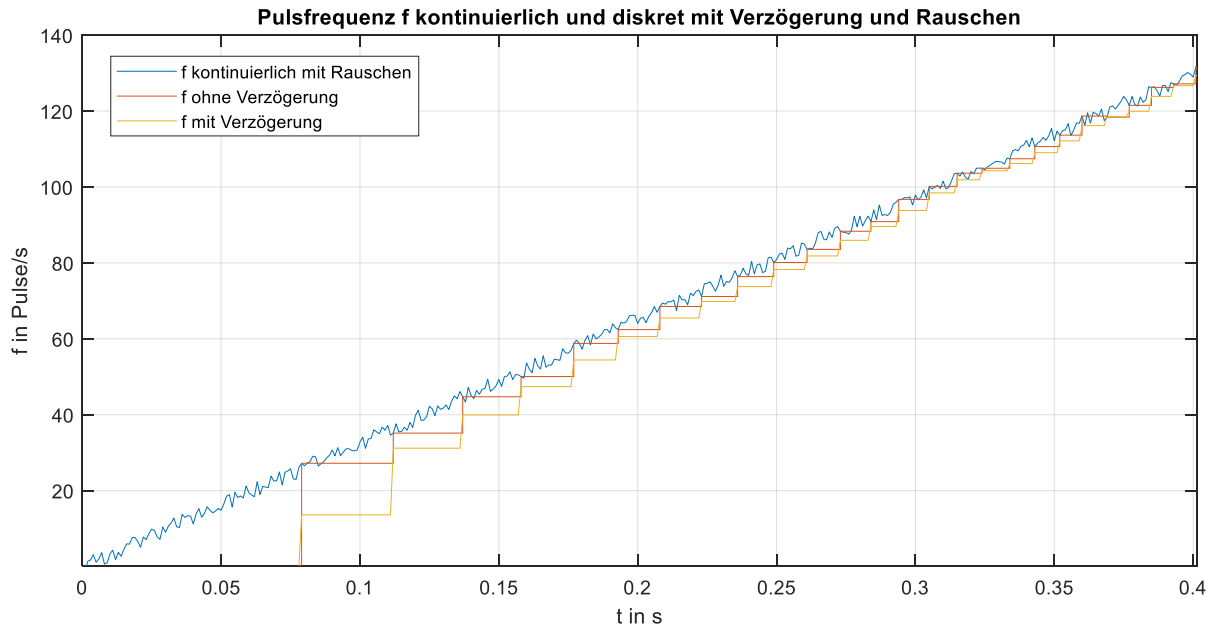


Abbildung 60 Pulsfrequenz kontinuierlich diskret und mit Verzögerung und Rauschen

In Abbildung 60 wurde die Simulation um ein Rauschen der Drehzahl erweitert. Es ist zu erkennen, dass die Verzögerung ab einem bestimmten Betrag der Geschwindigkeit bzw. Pulsfrequenz im Rauschen untergeht.

Wertdiskretisierung:

Nun wird das Frequenzsignal im Wert diskretisiert. Denn auch der Wert der Frequenz besitzt eine endliche Auflösung. Die Zeitmessung wird mittels Zählens von Flanken eines, in der Recheneinheit (Encoder-Karte) internen Frequenzsignals f_z (Clock), ermöglicht. Dieses hat in der Regel eine Frequenz von 10-100MHz. Wird die Drehzahl und somit die Pulsfrequenz der Inkremente f sehr groß, befinden sich zwischen zwei Inkrementen weniger Clock-Pulse als bei langsamen Geschwindigkeiten.

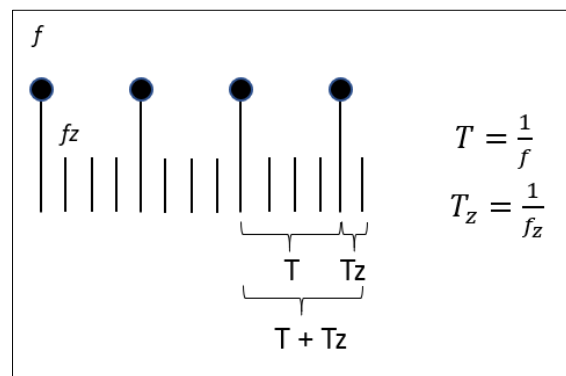


Abbildung 61 Pulsfrequenz f und Clock-Frequenz f_z

Die minimale Auflösung der Pulsfrequenz ergibt sich aus:

$$\Delta f = \frac{1}{T} - \frac{1}{T + T_z} = f - \frac{1}{\frac{1}{f} + \frac{1}{f_z}} = f - \frac{f}{1 + \frac{f}{f_z}}$$

$$\Delta f = \frac{f^2}{f_z + f}$$

Formel 14 Berechnung kleinster Auflösung Δf [f : Pulsfrequenz Encoder, f_z : interne Clock-Frequenz der Encoder-Karte]

Die Auflösung nimmt bei höherer Pulsfrequenz f ab und bei höherer Clock-Frequenz f_z zu.

Die Wertdiskretisierung von n ist simpler aufgebaut. Da n die Anzahl der aufsteigenden Flanken von Kanal 1 ist, ist dessen minimale Auflösung Δn gleich $n/4$, wenn alle Flanken berücksichtigt werden (Quadratur-Encoder).

Bei der Wertdiskretisierung von f und n wird das wertkontinuierliche Signal auf seine kleinste Wertauflösung Δf bzw. Δn abgerundet.

3.6.6 Technik-Fehlermodell

Zusätzlich wurden 3 technische Fehlerszenarien simuliert:

- Offsetfehler
- Steigungsfehler
- Ausfall

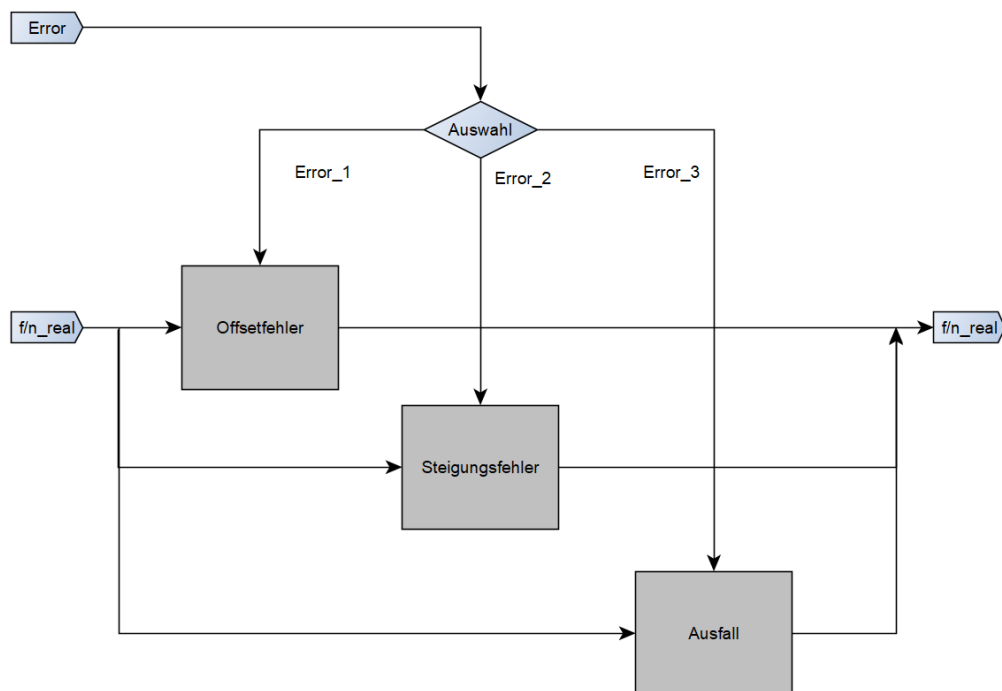


Abbildung 62 Implementierung Fehlerszenarien

Beim Offsetfehler wird der errechnete Wert der Pulsfrequenz um einen festen zeitunabhängigen Wert erhöht bzw. herabgesenkt. Dies hat keinen Einfluss auf bisherige Störungen, wie Rauschen, Schlupf, etc. Eine Ursache für solch ein Fehler könnte eine falsche Kalibrierung sein oder ein Berechnungsfehler. Ebenfalls durch eine falsche Kalibrierung kann es zu einem Steigungsfehler kommen.

Ein Ausfall des Sensors ist ebenfalls als mögliches Fehlerszenario modelliert. Dieser wird durch eine kontinuierliche Ausgabe des Wertes von 0 implementiert. Dazu wird optional noch ein weißes

Rauschen additiv dazugegeben, um das Rauschen zu simulieren, welches durch ein abgetrenntes Kabel erzeugt werden könnte.

Das gesamte Encodermodell wird als Simulink Library-Block gespeichert und mit Hilfe einer Maske können die Parameter aus Datenblättern von echten Encodern eingelesen werden.

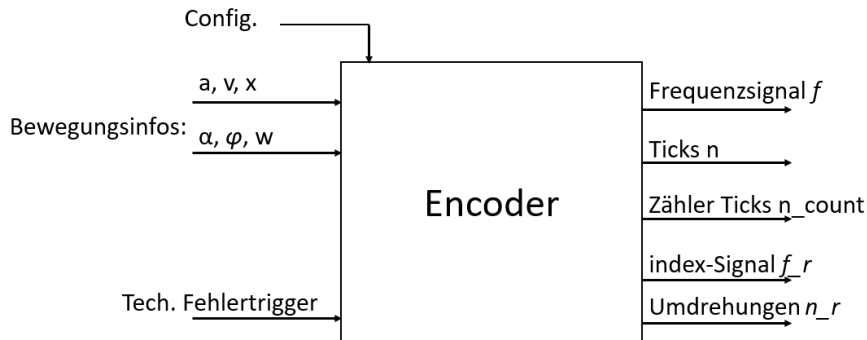


Abbildung 63 Encodermodell Library-Block

Diese Darstellung zeigt das Modell mit seinen Ein- und Ausgangssignale

3.7 Sensormodell: LVDT-Distanzsensork

Der LVDT-Sensor misst eine Positionsänderung nach den induktiven Messprinzip, welcher in Kapitel 2.6.3 erklärt wurde. Die Primärspule wird mit einer festen Frequenz f_0 angeregt. Durch magnetische Kopplung werden in den Sekundärspulen ebenfalls Wechselspannungen mit der Frequenz f_0 induziert. Anhand dessen Amplituden und Phasenverschiebungen (relativ zum Primärspannungssignal) wird auf die Messgröße geschlossen. Durch geeignete Signalverarbeitung wird aus den beiden Wechselspannungen der Sekundärspulen eine Gleichspannung, dessen Amplitude proportional zum Amplitudenunterschied der Spannungen der Sekundärspulen ist. Diese ist somit ein Indikator für den zurückgelegten Weg des Eisenkerns x . Folgende Darstellung zeigt prinzipiell die elektrischen Bauteile, wie sie im LVDT-Sensormodell abgebildet sind:

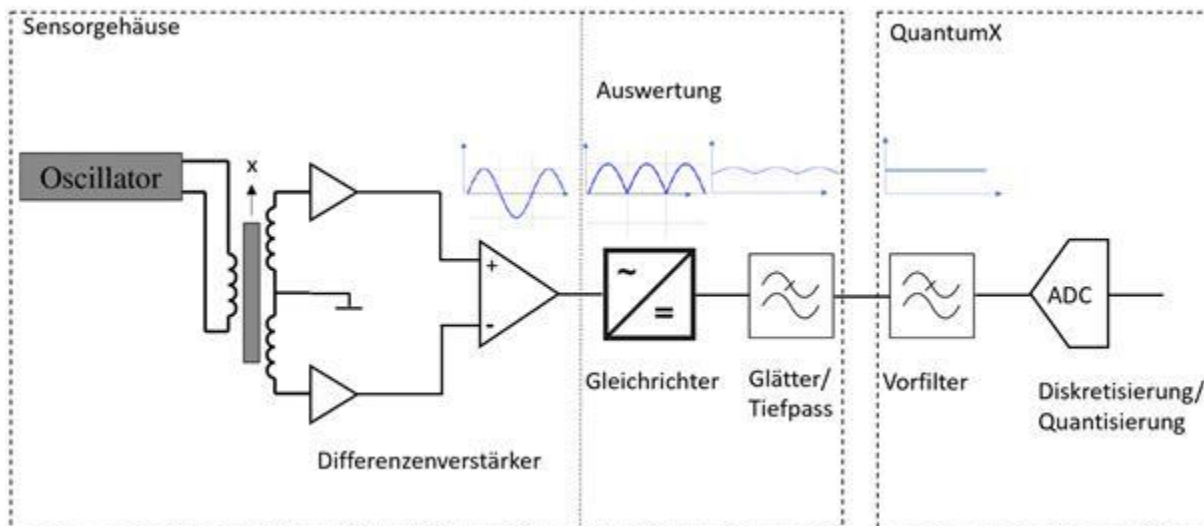


Abbildung 64: Prinzip-Schaltbild LVDT-Sensor und Signalverarbeitung mit Signalverläufe (eigene Nachbildung) [27, S. 103]

Das sinusförmige Ausgangssignal des Differentialtransformators wird im Sensorgehäuse gleichgerichtet, geglättet und anschließend vom Messverstärker gefiltert und digitalisiert.

Im Sensormodell des LVDT-Sensors sind folgende Inhalte implementiert:

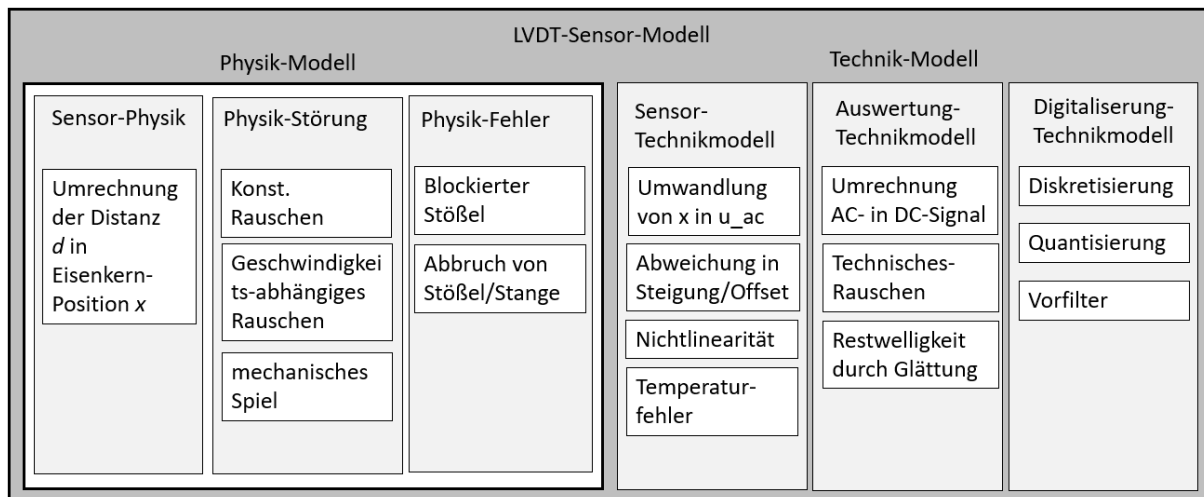


Abbildung 65 Funktionsübersicht LVDT-Sensormodell

Im Unterschied zu der Encoder-Simulation ist das Sensor-Technikmodell in drei Submodelle aufgeteilt:

- Sensor-Technik
- Auswertung-Technik
- Digitalisierung-Technik

Im Signalflossplan wird deutlich in welchem Strukturelement welches Bauteil aus Abbildung 64 modelliert wird und es sind die verwendeten Bezeichnungen der Größen innerhalb des Modells sichtbar. Die Messgröße ist die Distanz d und die Sensor-Ausgangsgröße ist ein digitaler Gleichspannungswert u_{dig} .

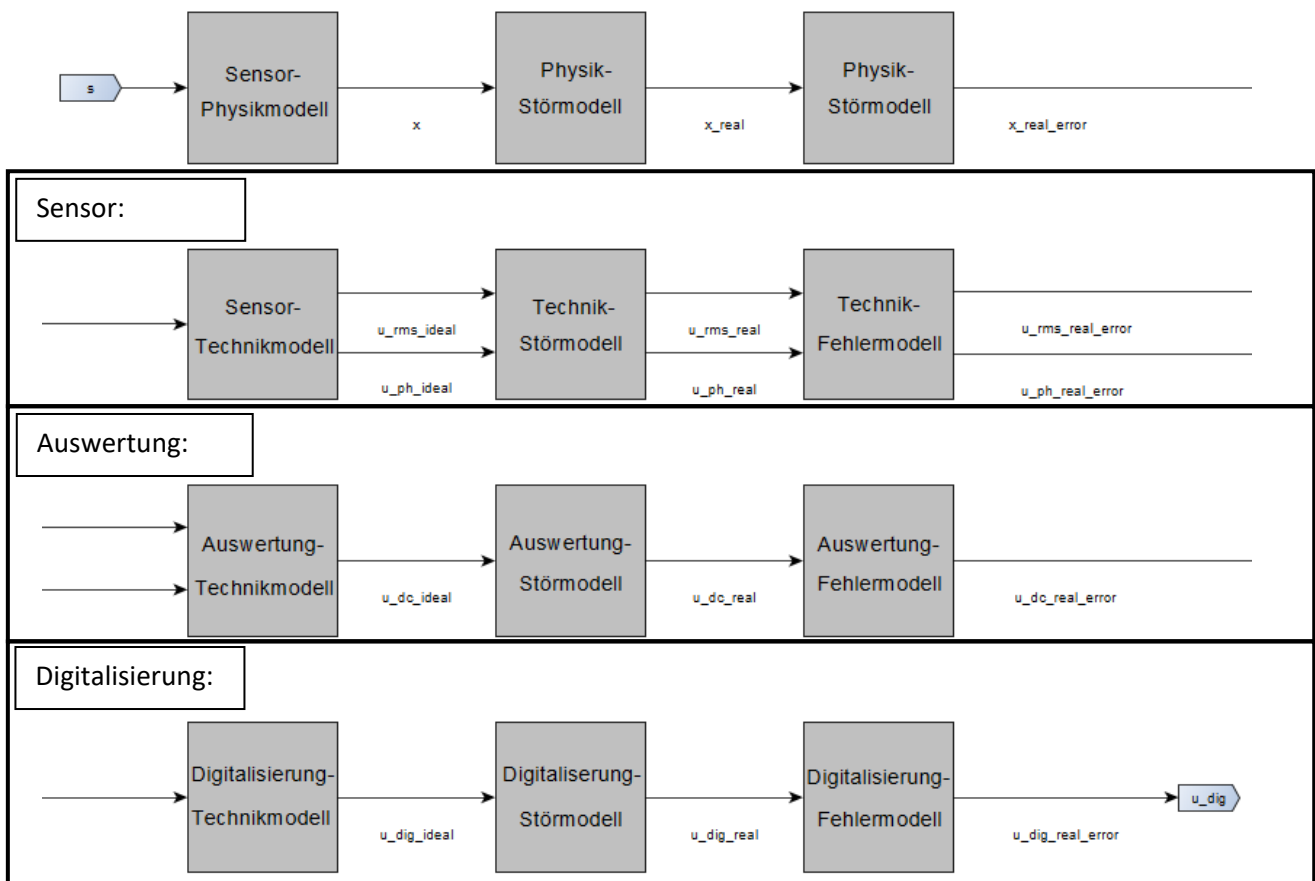


Abbildung 66 Signalflussplan LVDT-Sensormodell

3.7.1 Sensor-Physikmodell

Die Messgröße der Distanz d ist mechanisch durch ein Gestänge und einem Kugelgelenk mit dem Sensor gekoppelt. Die Änderung von d wird in eine Hubbewegung des Stößels im Sensor übersetzt. Zu jeder Distanz d existiert eine Kolbenstellung x . x ist so definiert, dass dessen Nullpunkt genau bei der Gleichgewichtsposition des Eisenkerns in der Mitte des Innenrohrs ist. Das Sensor-Physikmodell ist dementsprechend nur eine mechanische Übersetzung und Limitierung auf die Längenmaße des Sensors.

3.7.2 Physik-Störmodell

Das Physik-Störmodell beim LVDT-Sensormodell beinhaltet folgende Phänomene:

- Rauschen
- Totzeit
- Spiel

Rauschen:

Da jedes Bauteil eines fahrenden Zuges eine Vibration erfährt, ist hier auch ein additives Rauschsignal modelliert.

Totzeit:

Zwischen der Messgröße d und der Kolbenbewegung x wurde im Modell eine feste Totzeit eingebaut. Dieser soll eine Verzögerung zwischen Bewegung der Stange und dem Kolben simulieren. Diese

Verzögerung fasst alle elastischen Phänomene zusammen, die durch die Steifigkeit der Materialien zustande kommt. Zusätzlich können Totzeiten, verursacht durch die Berechnung und Signalverarbeitung hier berücksichtigt werden.

Spiel:

Die meisten LVDT-Sensoren weisen auf Grund ihrer Bauweise ein Spiel zwischen Bewegung des Stößels d und Bewegung des Eisenkernes x auf. Der Eisenkern bewegt sich erst ab einer gewissen Mindeständerung der Position des Stößels. Bewegt sich die Messgröße innerhalb der Grenzen des Spiels, kommt es zu keinem Ausschlag der Sensorgröße. Geht eine Positionsmessung bei 0m los und steigt kontinuierlich an, wird erst ab Überschreiten der Spiel-Grenze ein Signal ausgegeben.

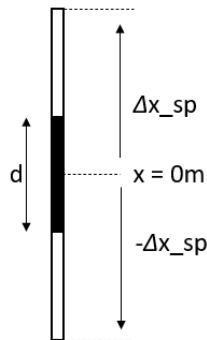


Abbildung 67 Spiel-Grenzen bei $\pm \Delta x_{sp}$

Diese Störung ist abhängig von der Richtung und Vergangenheit der Positionsänderung. Steigt d an, so zieht x unterhalb von d nach ($x = d - \Delta x_{sp}$). Bewegt sich d anschließend in die entgegengesetzte Richtung (nach unten), ändert x seinen Wert erst, nachdem d wieder an der unteren Spiel-Grenze angekommen ist. Ab diesem Zeitpunkt wird x oberhalb von d nachgezogen ($x = d + \Delta x_{sp}$) usw.

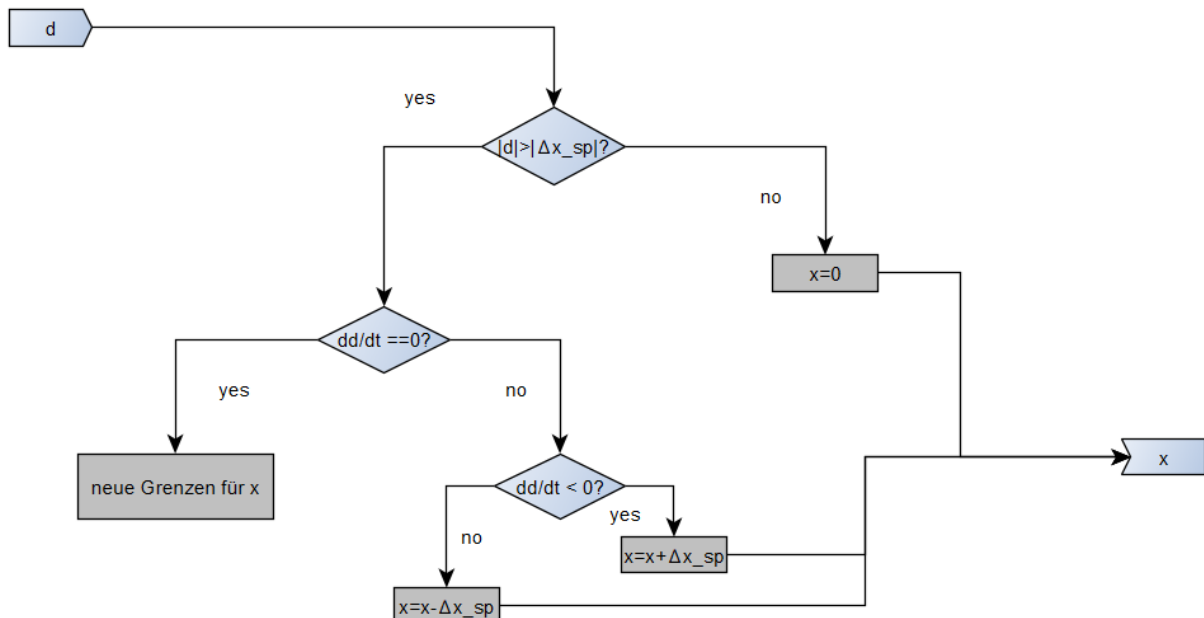


Abbildung 68 Flussdiagramm Implementierung Spiel

Nach jedem Extrempunkt von d (Ableitung $== 0$) wechselt die Beziehung zwischen d und x von $x = d + \Delta x_{sp}$ zu $x = d - \Delta x_{sp}$ oder andersherum.

Für eine Testsimulation zur Veranschaulichung der Implementierung des Spiels wurde eine konstant ansteigende Fahrtgeschwindigkeit angenommen. Als Eingangsgröße/Messgröße d für die

Sensorsimulation wird ein sinusförmiges Signal um 0 herum mit einer Amplitude von 9cm angenommen.

Simulationsparameter:

linearer Umrechnungsfaktor m von der Ausgangsspannung u_{dc} auf die Messgröße x	0.3V / cm
Maximaler Messbereich x_{limit}	± 15 cm
Maximale Amplitude der AC-Spannung an den Sekundärspulen u_{ana}	5V
Trägerfrequenz f_s	1000Hz
Linearitätsgrenze x_{max}	± 10 cm
Max. Abweichung durch Nichtlinearität	0.05% vom Messbereich
Dämpfung des Glätters damp	-90dB
Eckfrequenz Vorfilter A/D-Wandler f_{vf}	10Hz
Spannungspegel Sensorausgang u_{dig_max}	0..10V
Abtastzeit A/D-Wandler h	0.1s
Bitbreite A/D-Wandler w	8Bit

Tabelle 5 Simulationsparameter LVDT-Sensor

Für die Simulation des LVDT-Sensors wurde sich an das Datenblatt des LVDT-Sensors IW/150-0,25-PK10-KF der Firma TWK und der Auswerteinheit *QuantumX* von der Firma HBM gehalten. Einige Größen wurden jedoch verändert, um die simulierten Effekte besser darstellen zu können.

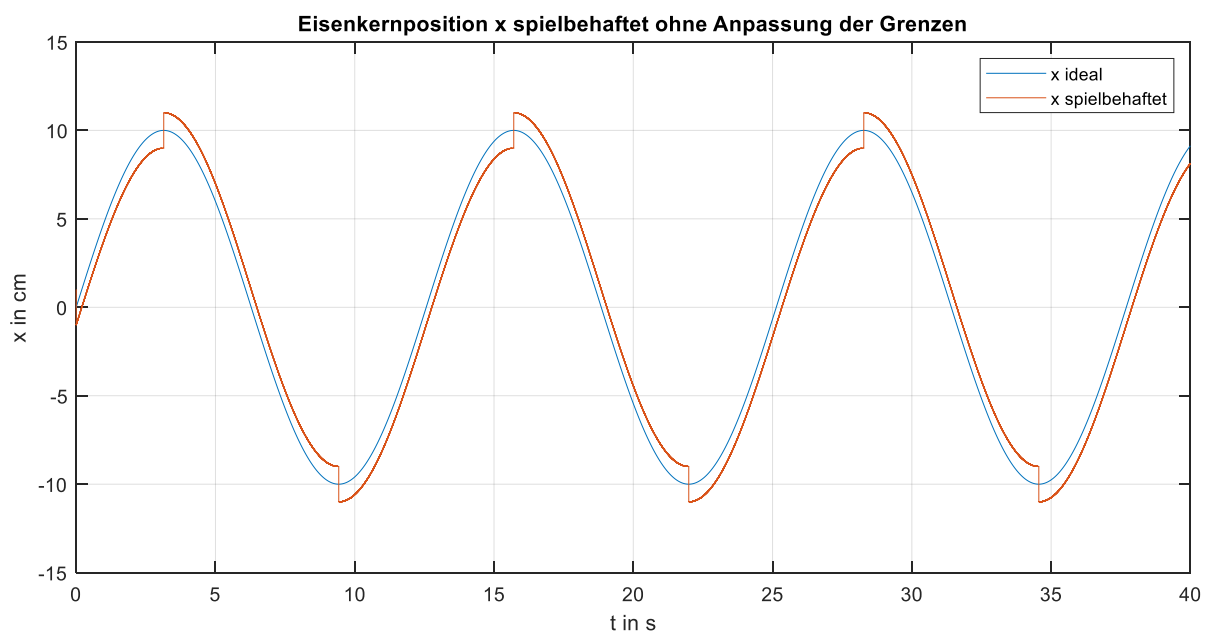


Abbildung 69 Eisenkernbewegung x mit Spiel ohne angepasste Grenzen (plakative Darstellung)

Wie man anhand dieses Signals sehen kann, springt die gemessene Distanz jedes Mal, wenn die Richtung der Bewegung (dd/dt) sich ändert.

Damit es bei diesen Zeitpunkten nicht zu Sprüngen kommt und auch die Pause von x bis zum Erreichen der anderen Spielgrenze bei $t=0$ s simuliert wird, werden auch die Ober- und Untergrenzen

immer neu angepasst. Realisiert wird das mittels eines dynamischen Limiters, welcher seine Ober- und Untergrenze den passenden Gegebenheiten anpasst:

Grenzen:

Grenze	$dd/dt > 0$	$dd/dt < 0$
Obergrenze	∞	$x_{ideal} - \Delta x_{sp}$
Untergrenze	$x_{ideal} + \Delta x_{sp}$	$-\infty$

Tabelle 6: Dynamische Ober- und Untergrenzen für x

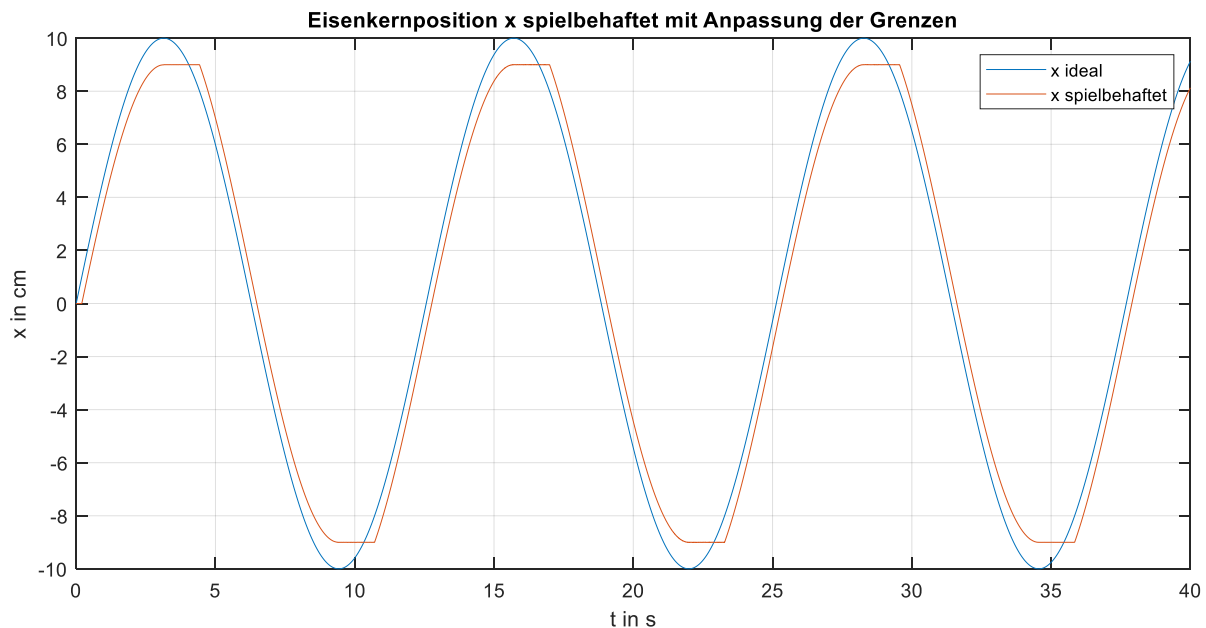


Abbildung 70 Eisenkernbewegung x mit Spiel mit angepassten Grenzen (plakative Darstellung)

Bei dieser Simulation wurde aus Anschaulichkeitsgründen das Spiel Δx_{sp} auf 1cm gesetzt, was keinem realistischen Wert entspricht.

3.7.3 Physik-Fehlermodell

Verschiedene Fehler können die Eisenkernposition x im Sensor zusätzlich beeinflussen:

Der Stößel kann durch Rost oder Verschmutzung im Innenrohr des Sensors steckenbleiben. Ist das der Fall, sendet der Sensor immer nur den gleichen Messwert für x aus, der unabhängig von der zu messenden Distanz d ist. Auch eine mechanische Beschädigung, beispielsweise ein Bruch des Stößels oder des Gestänges, ist möglich. In dem Fall würde der Sensor, durch eine Feder im Inneren oder der Schwerkraft, in eine der beiden Endpositionen rutschen und es würde immer die Messbereichsgrenze von x in einer Richtung gemessen werden. Die Implementierung in Simulink erfolgt analog zum Technik-Fehlermodell des Encoders. (Kapitel 3.6.6)

3.7.4 Technikmodell

Im Technikmodell des LVDT-Sensors wird zwischen Sensor, Auswertung und Digitalisierung in eigenen Modellen unterschieden. Das **Sensor-Technikmodell** beschreibt die Vorgänge im eigentlichen Sensor-System. Also die Erzeugung eines Wechselspannungssignals. Das **Auswertung-Technikmodell** umfasst die Umwandlung des AC-Signals in ein DC-Signal und das **Digitalisierung-Technikmodell** das Zeitdiskretisieren und Quantisierung des Ausgangssignals in der Auswertelektronik.

3.7.5 Sensor-Technikmodell

Die Größe der Position x wird in ein AC-Spannungssignal (das Trägerfrequenzsignal) umgewandelt. Dies geschieht bei der Differentialverstärkung der Induktionsspannungen in den Sekundärspulen. Weil die exakte Beschreibung der Physik den Rahmen dieses Kapitels überschreiten würde, ist man hier von einem Black-Box-System ausgegangen.

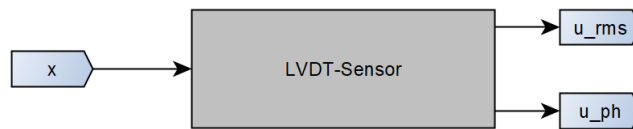


Abbildung 71 Black-Box-Darstellung der Physik im LVST-Sensor

Das AC-Trägersignal wird durch Umrechnung der Position x ermittelt. Jedoch wird die Schwingung des AC-Sinussignals nicht modelliert, sondern nur der Effektivwert u_{rms} und die Phaseninformation u_{ph} weitergeleitet. Der Umrechnungsfaktor zwischen dem Betrag von x und dem Effektivwert des AC-Ausgangssignals m ist (im Idealfall) linear und aus dem Datenblatt des Sensors zu entnehmen. Die Richtung von x ist anhand der Phasenverschiebung u_{ph} bezüglich der Phase der AC-Spannung an der Primärspule zu erkennen. Ein negatives x erzeugt eine Phasenverschiebung u_{ph} von 180° kleiner als ein positives x .

Typische Ausgangsspannung (Effektivwert) u_{rms} – Position x Kennlinie und Phasen-Kennlinie:

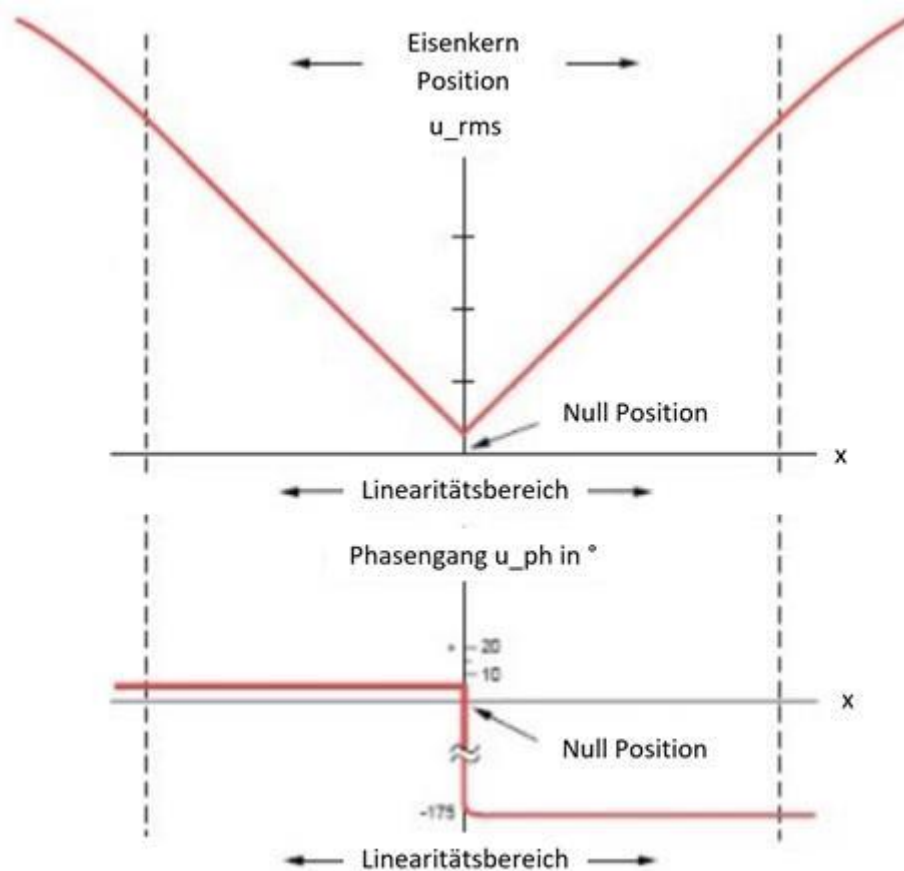


Abbildung 72: typische Kennlinie LVDT Sensor [41]

Wie man an den Rändern der u_{rms} - x -Kennlinie sieht, ist die Kurve für große x zunehmend nichtlinear. Ein LVDT-Sensor besitzt eine Linearitätsgrenze für den Messwert, ab welchem nicht mehr von einer linearen Kennlinie ausgegangen werden kann. Dies hat mit dem technischen Aufbau des

Sensors zu tun. [27, S. 13-15] Die maximale Abweichung wegen Nichtlinearität innerhalb der Linearitätsgrenze kann dem Datenblatt des LVDT-Sensors entnommen werden.

Da die Phasenverschiebung ein Indikator für die Richtung der Eisenkernposition x ist, wird in der Auswertung die Phaseninformation ebenfalls genutzt.

3.7.6 Sensor-Störmodell

Folgende Störphänomene wurden im Sensor-Störmodell des LVDT-Sensors implementiert:

- Nichtlinearität
- Steigungsabweichung und Offset
- Rauschen

Nichtlinearität:

Die Nichtlinearität wurde als eine quadratische Abweichung der linearen Ideal-Kennlinie modelliert. Dabei wird zusätzlich die Information der Linearitätsgrenze x_{max} und der maximalen Nichtlinearitätsabweichung Δx_{nl} vom Datenblatt benötigt. Diese max. Abweichung wird in der Regel als Prozentteil des gesamten Wertbereiches angegeben und beschreibt die größte Abweichung der realen Kennlinie von der idealen Kennlinie innerhalb des Linearitätsbereiches. In diesem Fall befindet sie sich am Rand des Linearitätsbereiches und nimmt, so näher man an $x=0$ gelangt, ab. Aus diesen Informationen wurde folgendes Kennlinien-Polynom berechnet:

$$u_{rms}(x) = m * x - \frac{m * \Delta x_{nl}}{x_{max}^2} * x^2$$

Formel 15 Quadratische Kennlinie [m : ideale Steigung, Δx_{nl} : Max. n.l. Abweichung, x_{max} : Ende Linearitätsbereich]

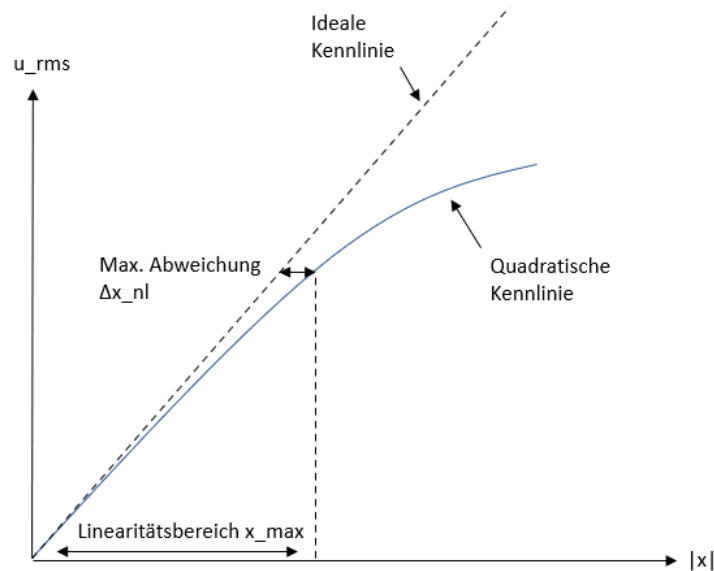


Abbildung 73 Skizze Quadratische Kennlinie

Der quadratische Anteil dieses Polynoms wird als eine Störung auf das ideal berechnete u_{rms} auf subtrahiert.

Um den Nichtlinearitätsanteil der Störung sichtbarer zu machen, wurden für eine Simulation alle Rauschamplituden auf 0V gesetzt. In folgender Abbildung kann man erkennen, dass die Abweichung der realen und der idealen Kurve, so weiter u sich von 0V befindet, größer wird.

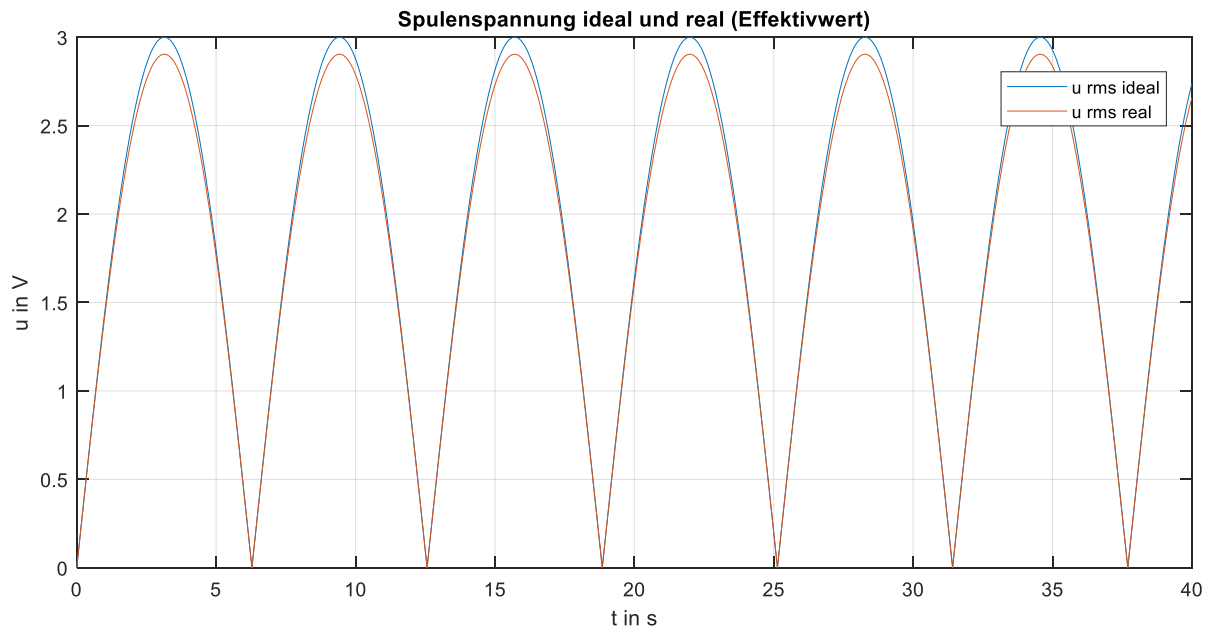


Abbildung 74 RMS-Spannung am Sensorausgang mit Nichtlinearitätsanteil (plakative Darstellung)

Steigungsabweichung und Offset:

Auch eine Abweichung der im Datenblatt angegebenen linearen Umrechnung und eine Nullpunktabweichung wurden in Form einer Steigungsabweichung und eines Offsets modelliert.

Rauschen:

Ein zusätzliches weißes Rauschen fasst alle statistischen Störungen, verursacht durch die analogen Bauteile, zusammen.

3.7.7 Sensor-Fehlermodell

Nicht implementiert.

3.7.8 Auswertung-Technikmodell

Die Auswertung vom AC-Signal erfolgt mittels einer Gleichrichtung und anschließender Glättung und Verstärkung des Signals. Die elektronischen Bauteile dafür befinden sich im Sensorgehäuse. Das Ausgangssignal des Sensors ist somit eine analoge Gleichspannung. Das resultierende Signal ist gleich dem Betrag des Effektivwerts des AC-Signals. Dieses Signal wird verstärkt und mit einem Offset versehen, um es auf den gewünschten Pegel zu bringen. Die Phasenverschiebung des AC-Signals wird für die Richtungsinformation genutzt.

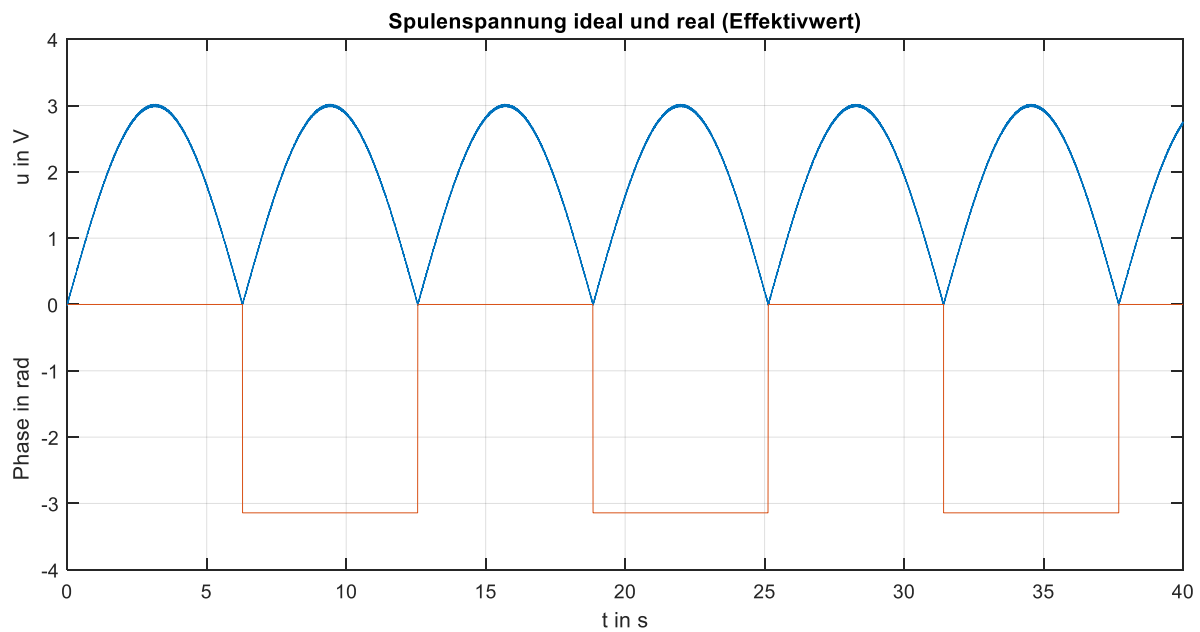


Abbildung 75 Phase und Betrag vom gleichgerichteten u_{rms}

In folgender Simulation wurde das gleichgerichtete Signal u_{rms} , welches zwischen 0 und 3V schwingt auf einen Pegel von 0 bis 10 V Gleichspannung angehoben und die Phase als Richtungsinformation genutzt:

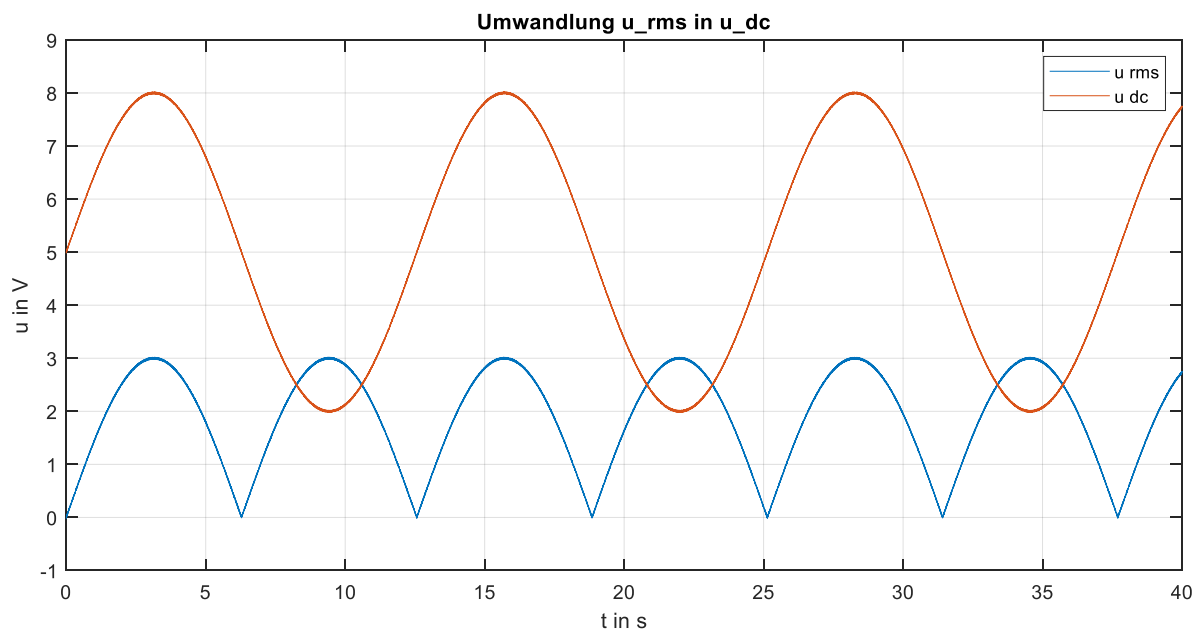


Abbildung 76 Betrag des RMS-Signals und das DC-Sensor Ausgangssignal

Das Sensormodell für den LVDT-Sensor kann mit den entsprechenden Parameter $config_u_{Lvl}$ auf folgende Ausgangsspannungspegel konfiguriert werden:

- $u_{dc} = 0..5V$
- $u_{dc} = 0..10V$
- $u_{dc} = \pm 5V$
- $u_{dc} = \pm 10V$

Somit sind alle Varianten, welches die Auswertereinheit *QuantumX* für analoge Eingangssignale unterstützt, abgedeckt.

3.7.9 Auswertung-Störmodell

Folgende Phänomene wurden im Auswertungs-Störmodell des LVDT-Sensormodells implementiert:

- Restwelligkeit
- Temperaturabweichung

Restwelligkeit:

Durch die Glättung entsteht eine gewisse Restwelligkeit im DC-Signal, die von der Dämpfung des Glätters (Tiefpassfilters) und der Amplitude der AC-Spannung abhängt. Dies wird als ein sinusförmiges Störsignal auf das DC-Signal aufaddiert. Die Frequenz dieser Störung ist, wegen der zuvor stattgefundenen Gleichrichtung das Doppelte der Frequenz der AC-Spannung.

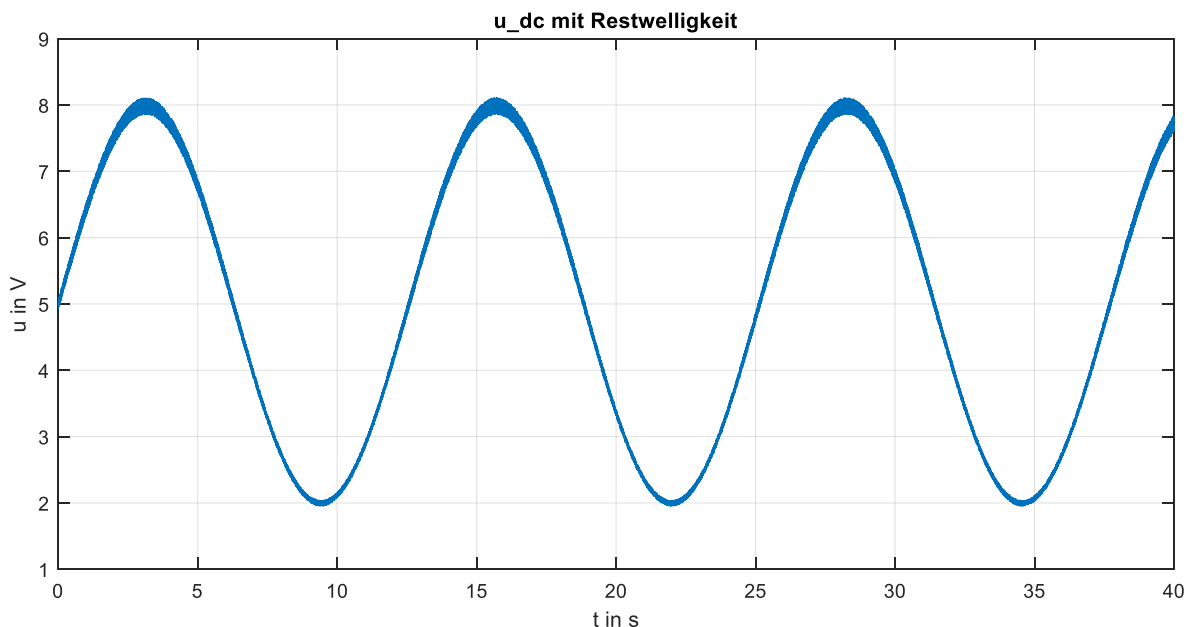


Abbildung 77 Sensorausgangssignal u_{dc} mit Restwelligkeit (plakative Darstellung)

Wie diese Darstellung zeigt, ist die Welligkeit proportional zum Spannungswert des Signals. Die Ursache liegt am Tiefpassverhalten des Glätters. Dessen Dämpfung ist abhängig von der Amplitude des Eingangssignals (u_{rms}).

Temperaturabweichung:

Auch die Temperatur hat einen Einfluss auf die Kennlinie. Die Information der Temperatur stammt von einem Temperaturfühler, der an dem Fahrwerk angebracht ist. Im Datenblatt von LVDT-Sensoren sind zwei Faktoren zur temperaturabhängigen Messabweichungen gegeben: $tk0$ und tkc .

- $tk0$ gibt den prozentuellen Offsetfehler in Abhängigkeit von der Temperatur an.
- tkc gibt den prozentuellen Steigungsfehler in Abhängigkeit der Temperatur an.

$tk0$ und tkc geben an, um wie viel Prozent des Maximalwerts der gemessene Wert bzw. die Steigung der Kennlinie sich pro 10 K Temperaturabweichung ändert.

Die Messabweichung Δu wird dann wie folgt berechnet:

Offsetfehler:

$$\Delta u = tk_0 * \frac{1}{100\%} * U_{max} * \frac{1}{10K} * (T - T_{ref})$$

Formel 16: Offset-Temperaturfehler [Δu : Spannungsfehler in V, tk_0 : Temperaturfehler in %pro10K, U_{max} : Maximalspannung in V, T : Temperatur in K, T_{ref} : Referenztemperatur in K]

Steigung-Temperaturfehler:

$$\Delta u = u_{ideal} * [tkc * \frac{1}{100\%} * U_{max} * \frac{1}{10K} * (T - T_{ref})]$$

Formel 17: Steigung-Temperaturfehler [Δu : Spannungsfehler in V, tkc : Steigungsfehler in %pro10K, U_{max} : Maximalspannung in V, T : Temperatur in K, T_{ref} : Referenztemperatur in K]

3.7.10 Auswertung-Fehlermodell

Nicht implementiert

3.7.11 Digitalisierung-Technikmodell

Das analoge DC-Signal muss, um weiterverarbeitet werden zu können, in ein digitales Signal umgewandelt werden. Dazu ist eine Zeit- und Wertdiskretisierung notwendig. Diese Vorgänge erfolgen in der Verstärkerstufeneinheit *QuantumX* von HBM.

Bevor die Signale abgetastet und quantisiert werden, dämpft ein Vorfilter hochfrequente Störungen, wie Rauschen, Aliasingeffekte und die Restwelligkeit des Glätters ab (siehe Abbildung 64). Bei diesem Filter handelt es sich um einen Bessel-Filter 4ter Ordnung (laut Datenblatt *QuantumX*).

Für die Übertragungsfunktion des Bessel-Filters 4ter Ordnung gilt:

$$F(s) = \frac{105}{\frac{1}{w_0^4}s^4 + \frac{10}{w_0^3}s^3 + \frac{45}{w_0^2}s^2 + \frac{105}{w_0}s + 105}$$

Formel 18 s-Übertragungsfunktion Bessel-Filter

Da die Simulationsumgebung mit festen Zeitabschnitten arbeitet, ist die kontinuierliche Darstellung der Übertragungsfunktion $F(s)$ nicht brauchbar. Sie muss in eine diskrete Übertragungsfunktion $F(z)$ überführt werden. Dies kann über die *c2d()*-Funktion in Matlab erfolgen.

Für eine Eckfrequenz von 10Hz (Datenblatt *QuantumX*) gilt für $F(z)$:

$$F(z) = \frac{0.0000601z^3 + 0.000582z^2 + 0.0005136z + 0.00004122}{z^4 - 3.393z^3 + 4.339z^2 - 2.479z + 0.5335}$$

Formel 19 z-Übertragungsfunktion Bessel-Filter (10Hz)

Die Umsetzung im Simulink-Modell erfolgt über einer diskreten Übertragungsfunktion nach Formel 19.

3.7.12 Digitalisierung-Störmodell

Ist das Signal gefiltert, erfolgt die Zeitdiskretisierung und die Quantisierung. Es wird nach der Abtastzeit des *QuantumX* diskretisiert. Für die Wertdiskretisierung ist die Wortbreite (in Bit) aus dem

Datenblatt des *QuantumX* zu entnehmen. Für die kleinstmöglich gemessene Spannungsänderung bzw. die Quantisierungsstufe p gilt:

$$p = \frac{u_{dig_max}}{2^w}$$

Formel 20 Berechnung Quantisierungsstufe [u_{dig_max} : Maximal messbare digitale Spannung, w : Bitbreite A/D-Wandler]

In der Simulink-Implementierung wird das Spannungssignal auf die minimale Quantisierungsstufe abgerundet.

3.7.13 Digitalisierung-Fehlermodell

Nicht implementiert

Das gesamte LVDT-Sensormodell wird als Simulink Library-Block gespeichert und mit Hilfe einer Maske können die Parameter aus Datenblätter von echten LVDT-Sensoren eingelesen werden. Da das Digitalisierungsmodell auch für die weiteren, in diesem Kapitel, beschriebenen Sensormodelle verwendet wird, ist dafür ein eigenes Modell (A/D-Wandler) in die Bibliothek erstellt worden.

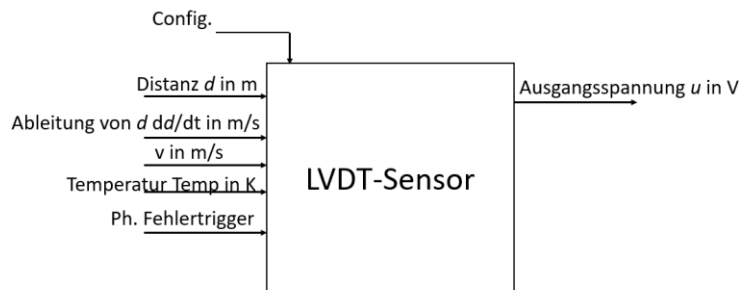


Abbildung 78 LVDT-Sensor Library-Block

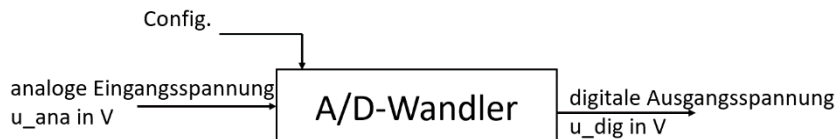


Abbildung 79 Digitalisierungsmodell Library-Block

Diese Darstellungen zeigen die Modelle der LVDT-Sensoren und Messverstärker (A/D-Wandler) mit allen Ein- und Ausgangssignalen.

3.8 Sensormodell: Laser-Distanzsensorik (Triangulation)

Folgende physikalische und technische Phänomene wurden für das Laser-Abstandssensormodell berücksichtigt:

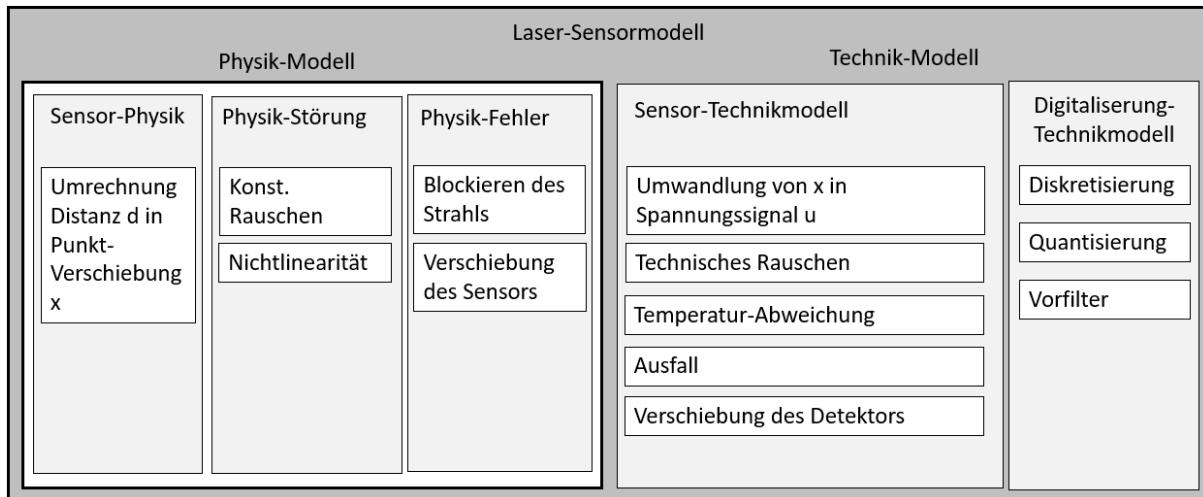


Abbildung 80 Laser-Distanzsensormodell Funktionsübersicht

3.8.1 Sensor-Physikmodell

Die im NGT-FuN eingesetzte Lasersensor-Technologie ist die, im Kapitel 2.6.4 beschriebene, Laser-Triangulation. Das reale Physikmodell berechnet aus der Distanz, vom Laseremitter zum Objekt, die Punkt-Verschiebung x vom reflektierten Signal am Detektor-Array. Diese trigonometrische Berechnung wird linearisiert und in den Datenblättern sind die linearen Zusammenhänge in Form eines Umrechnungsfaktors zwischen Distanz und Ausgangsspannung angegeben. Dieser lineare Zusammenhang wird im Sensor-Physikmodell als das ideale Sensor-Verhalten definiert.

$$u = m_{\text{laser}} * d$$

Formel 21 lineare Berechnung von der analogen Ausgangsspannung u in V [m_{laser} : Umrechnungsfaktor in V/m, d : Distanz in m]

3.8.2 Physik-Störmodell

Folgende Phänomene wurden im Physik-Störmodell des Laser-Sensormodells implementiert:

- Nichtlinearität
- Rauschen

Nichtlinearität:

Wie oben bereits erwähnt, ist die rechnerische Ermittlung von der Distanz d nicht linear zur Punkt-Verschiebung x . Dieser nichtlineare Anteil wird als eine quadratische Funktion approximiert und als ein Störsignal zum idealen Signal draufaddiert. In den Datenblättern wird die Abweichung durch die Nichtlinearität in Prozent des Messbereiches angegeben und ist am größten bei der weitesten Distanz. Die quadratische Funktion des quadratischen Fehlers ist identisch aufgebaut, wie bei dem LVDT-Sensormodell.

Rauschen:

Ein weißes Rauschsignal simuliert statistische Störeinflüsse physikalischer Natur und wird ebenfalls zu dem idealen Signal überlagert.

3.8.3 Physik-Fehlermodell

Es kann zu einigen realistischen Fehlerszenarien kommen wie,

- Blockierung des Lasers zum Beispiel durch Schmutz (kontinuierliches 0-Signal)

- Verschiebung oder Verdrehung des Sensors am Befestigungsort (Offset-Fehler und Steigungsfehler)

3.8.4 Sensor-Technikmodell

Die im Physikmodell beschriebene Verschiebung x wird im Technikmodell in ein Spannungssignal mit einstellbarem Spannungspegel umgerechnet:

- $u = 0..5V$
- $u = 0..10V$
- $u = \pm 5V$
- $u = \pm 10V$

Diese Berechnung erfolgt mit einem linearen Zusammenhang.

3.8.5 Technik-Störmodell

Die Verschiebung des Laserpunktes x wird mit einer CCD-Zeile (1-D Fotodetektor-Array) gemessen. Ein Fotodioden-Array hat immer eine endliche Auflösung, was sich im Spannungssignal erkenntlich macht. Daher ist der minimal messbare Distanzunterschied dieser, wo genau eine neue Fotodiode angestrahlt wird.

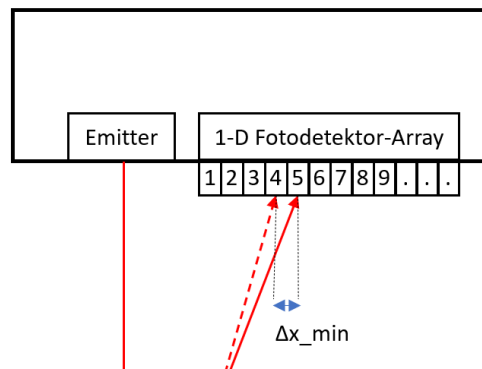


Abbildung 81 Lasersensor mit 1-D Fotodioden-Array [Δx_{\min} : minimale Auflösung von x]

Da die Messung von x technisch nicht kontinuierlich erfolgt, muss im Technik-Störmodell auch die Auflösung berücksichtigt werden. Die minimale Auflösung ist in der Regel in den Datenblättern der jeweiligen Sensoren zu finden. Die Implementierung im Simulink-Modell des Laser-Sensors erfolgt analog zu der Wertdiskretisierung beim Encodermodell und der Quantisierung im Digitalisierungsmodell durch Abrunden auf Δx_{\min} .

Ebenfalls im Datenblatt zu finden sind Werte für die temperaturbedingten Abweichungen vom idealen Wert. Diese werden analog zu den Temperaturabweichungen beim LVDT berechnet. Ein zusätzlich überlagertes weißes Rauschen simuliert die zufälligen Störungen technischer Ursache.

3.8.6 Technik-Fehlermodell

Auch auf der technischen Seite können Fehlerszenarien entstehen. Folgende wurden implementiert:

- Ausfall des Lasers (kontinuierliches 0-Signal)
- Verschiebung des Detektors (Offsetfehler)

3.8.7 Digitalisierung-Technikmodell

Die Umwandlung der analogen Ausgangsspannung des Sensors in die digitale Spannung für die Auswertung erfolgt analog zum Digitalisierungsmodell vom LVDT-Sensor.

Das gesamte Lasersensormodell wird als Simulink Library-Block gespeichert und mit Hilfe einer Maske können die Parameter aus Datenblättern von echten Lasersensoren eingelesen werden.

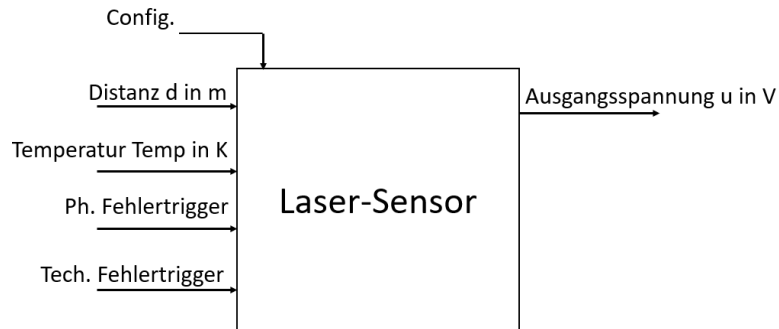


Abbildung 82 Lasersensor Library-Block

Diese Darstellung zeigt das Modell mit allen Ein- und Ausgangssignalen.

3.9 Sensormodell: Kraft- und Momentsensorik (DMS)

Das Prinzip der Kraft- und Momentsensoren wurde in Kapitel 2.6.5 beschrieben. Im Folgenden wird die Modellierung eines resistiven Kraftsensors beschrieben. Die Momentsensoren im NGT-FuN basieren ebenfalls auf DMS-Technologie, sodass die folgenden Beschreibungen des Sensormodells mit allen physikalischen und technischen Phänomenen, welches hier beispielhaft für einen Kraftsensor dekliniert wird, auch für den Momentsensor gelten.

Eine Kraft wirkt auf einen Federkörper, welcher sich verformt. Dehnungsmessstreifen, die an dem Körper angebracht sind, erzeugen aus der Dehnungsänderung eine Widerstandsänderung, welche wiederum für ein Spannungssignal sorgt.

Auch hier wurde die Struktur aus Kapitel 3.5 verwendet, um folgende physikalische und technische Stör- und Fehlereffekte zu modellieren:

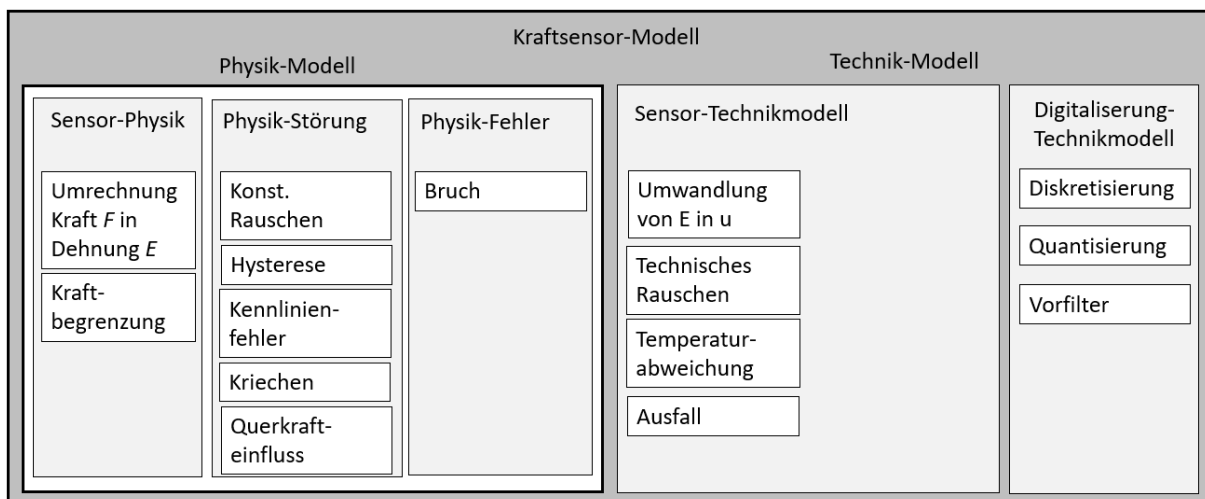


Abbildung 83 Überblick Kraftsensormodell

Die Signalstruktur des Modells wird anhand dieser Abbildung ersichtlich:

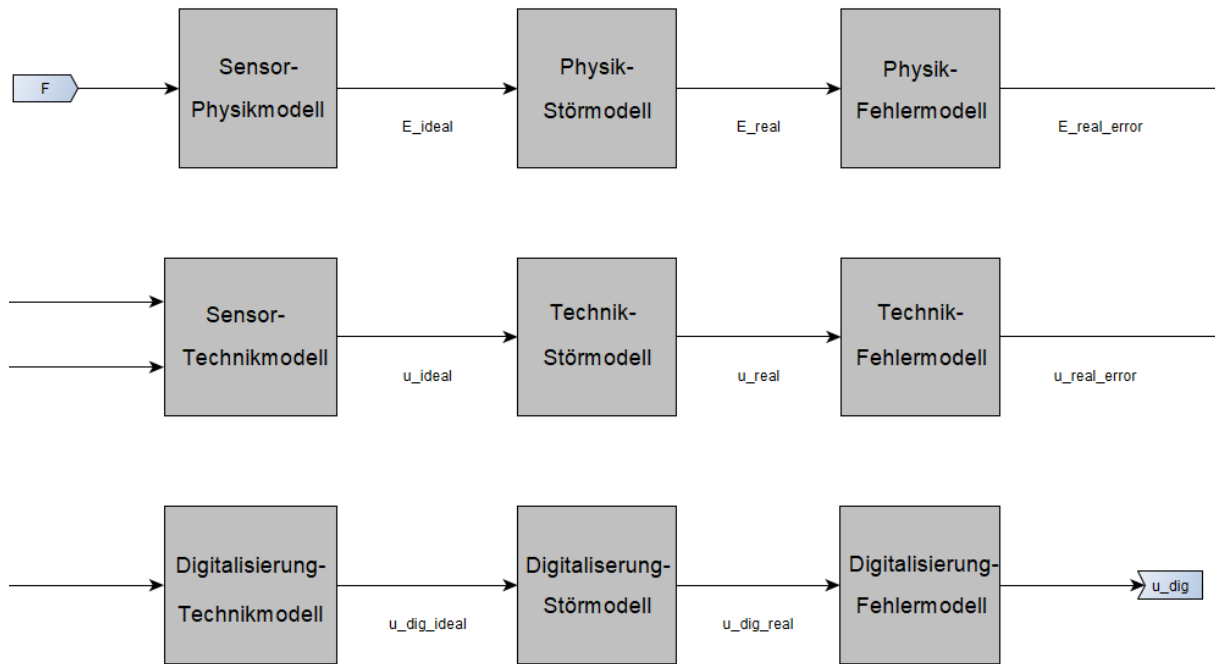


Abbildung 84 signalflussplan Kraftsensormodell

Es gelten folgende Analogien der Signale zum Momentsensor:

Signal	Kraftsensor	Momentsensor
Messgröße:	Kraft F	Moment T
Zwischengröße:	Dehnung E	Torsionswinkel θ
Ausgangsgröße:	Spannung u	Spannung u

Tabelle 7 Analogien der Signale für die Implementierung des Kraft- und Momentsensors

Bis auf die Signalbezeichnungen und Parameter sind die Sensormodelle für den Momentsensor und des Kraftsensors in der Struktur und allen modellierten Stör- und Fehlerphänomenen identisch.

3.9.1 Sensor-Physikmodell

Das ideale Physikverhalten besteht aus einer Limitierung der Messgröße F auf die Maximalkraft $\pm F_{max}$, welche im Datenblatt des Sensors zu finden ist und der Umrechnung von der Kraft F in die Dehnung E mit Hilfe der Steifigkeit D .

$$E = \frac{F}{D}$$

Formel 22 Umrechnung Kraft in Dehnung [E : Dehnung in m, F : Kraft in N, D : Steifigkeit in N/m]

3.9.2 Physik-Störmodell

Im Störmodell werden folgende Phänomene modelliert:

- Rauschen
- Kennlinienfehler
- Hysterese
- Kriechen
- Querkrafteinfluss

Rauschen:

Ein physikalisches Rauschen fasst alle statistischen Messfehler und Störungen zu einem weißen Rauschen zusammen, welches auf den Wert der Dehnung E aufaddiert wird. Diese können durch Vibrationen, zufällige Kraftstöße, als Ursache von Unebenheiten an der Schiene sein.

Kennlinienfehler:

Eine Abweichung der Kraft-Dehnungs-Kennlinie zum idealen, linearen Verlauf wurde wie bei dem LVDT-Sensormodell mit einem quadratischen Anteil modelliert, welcher die Abweichung bei zunehmender Kraft größer werden lässt. Auch eine Richtungsabhängigkeit des linearen Umrechnungsfaktors von Kraft auf Dehnung wurde implementiert, da einige Federkörper bei einer Dehnung eine andere Steifigkeit aufweisen als bei einer Stauchung.

Hysterese:

Unter Hysterese oder der Umkehrspanne bei Sensoren versteht man eine richtungsabhängige nichtlineare Abweichung der Kennlinie, die von der Vorgeschichte der Messung abhängt. Ursache dafür können ein mechanisches Spiel oder Reibung im Material sein. [30, S. 63]

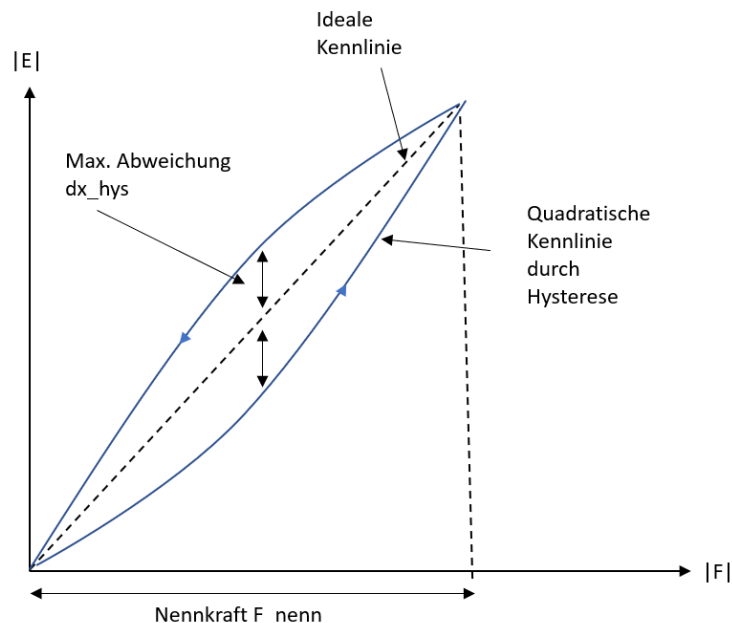


Abbildung 85 Skizze quadratisch approximierte Kennlinienabweichung durch Hysterese

In diesem Fall wurde die Kennlinie durch einen quadratischen Fehler erweitert. Dieser ist, wenn die Dehnung zunimmt negativ und wenn sie abnimmt positiv. Die maximale Umkehrspanne ΔE_{hys} befindet sich in der Mitte des Nennbereichs der Dehnung.

Für den quadratischen Fehler gilt.

$$\Delta E(E) = \frac{\frac{dF}{dt}}{\frac{dF}{dt}_{max}} * \left[\frac{\Delta E_{hys}}{\left(\frac{E_{nenn}}{2}\right)^2} E_{ideal}^2 - \frac{2\Delta E_{hys}}{\frac{E_{nenn}}{2}} E_{ideal} \right]$$

Formel 23 quadratische Abweichung durch Hysterese [dF/dt : Ableitung der Kraft, dF/dt_{max} : Maximale Änderungsrate, ΔE_{hys} : maximale Abweichung durch Hysterese, E_{nenn} : Dehnung bei Nennkraft, E_{ideal} : ideale Dehnung (linear zu F)]

Diese quadratische Funktion wurde so ausgelegt, dass ihr Extrempunkt, also die maximale Abweichung zur idealen Kennlinie in der Mitte der Nenndehnung (Dehnung bei Nennkraft) liegt. Da

die Hysterese ein zeitabhängiges Phänomen ist, ist dies zudem so modelliert, dass die Abweichung von der normierten Steigung (erste Ableitung der Kraft dF/dt auf die Steigung normiert, welche im Datenblatt bei der Hysterese angegeben ist) ebenfalls abhängig ist.

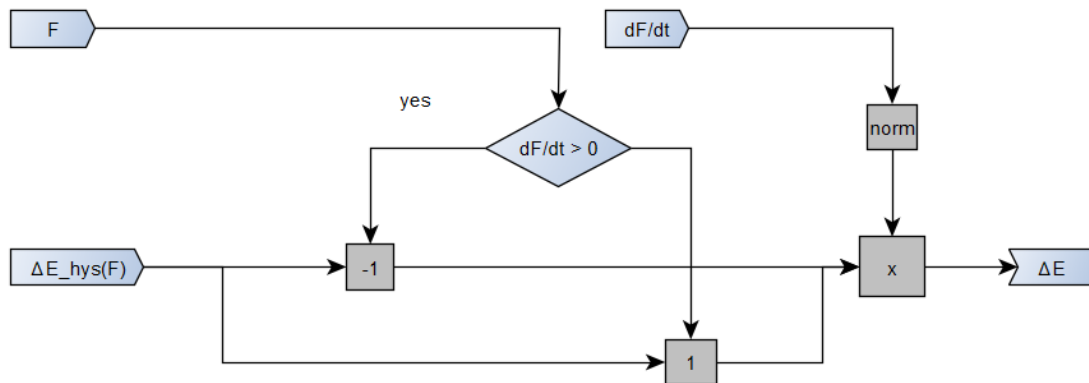


Abbildung 86 Signalflussplan Berechnung Abweichung durch Hysterese

Steigt die Kraft schneller an, so ist der Fehler größer. Ist die Steigung zu einem gewissen Zeitpunkt Null (keine Kraft oder Kraft-Minima/Maxima), ist auch keine Abweichung durch Hysterese modelliert. Dies sorgt dafür, dass es bei Übergängen zwischen steigender Kraft und fallender Kraft keine sprunghaften Änderungen des Ausgangssignals gibt.

Der im Datenblatt als maximale Abweichung durch Hysterese betitelte Parameter ΔE_{hys} wird in diesem Modell als Maximalwert des Fehlers, also bei maximaler Steigung und im Bereich in der Mitte des Nennbereichs festgelegt.

Folgender Plot veranschaulicht die Hysterese mittels einer sinusförmigen Eingangsgröße mit einer Frequenz von 0.04Hz und einer Dehnungsamplitude von 5 mm.

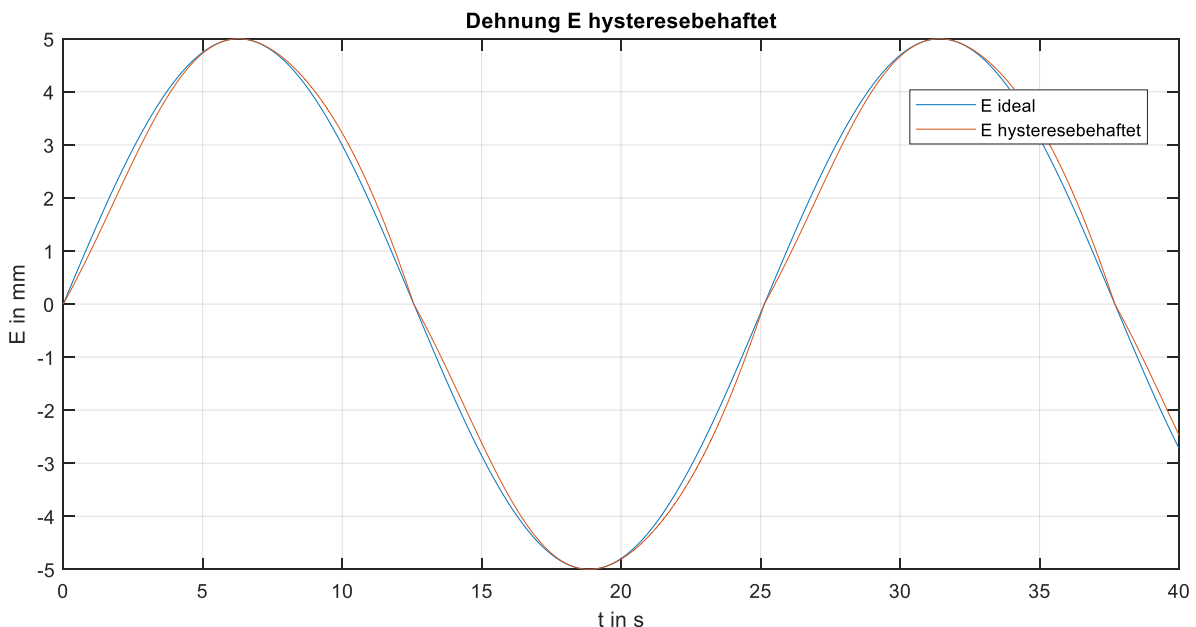


Abbildung 87 Dehnung E mit und ohne Abweichung durch Hysterese (plakative Darstellung)

Zum Verdeutlichen der Hysterese-Abweichung wurde eine max. Abweichung von 7.5% der Nenndehnung gewählt. Abbildung 87 zeigt den sinusförmigen Verlauf der Dehnung E mit und ohne Abweichung durch die Hysterese.

Kriechen:

Eine weitere nichtlineare Störung ist das Kriechen. Dies ist ein zeitabhängiger Vorgang. Wechselt die Richtung der Kraft eines Federkörpers nicht, so kommt es zu einem mechanischen Kriechvorgang. Dabei wird aufgrund der Viskosität des Materials die Gitterstruktur beeinflusst und es kommt zu Fließprozessen im Molekularbereich innerhalb des Federkörpers. [30, S. 54] Alle dafür verantwortlichen werkstofftechnischen Prozesse werden in diesem Modell durch eine zeitliche Exponentialfunktion approximiert. Bei einer konstant wirkenden Kraft kriecht der Wert der Dehnung anhand dieser Funktion.

$$\Delta E(t) = \Delta E_{crl} * (1 - e^{-\frac{5t}{T_{crl}}})$$

Formel 24 Formel Belastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s]

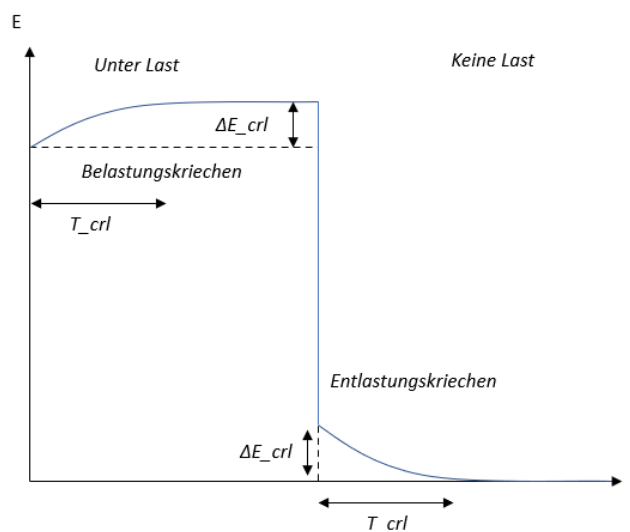


Abbildung 88 Skizze Belastungs- und Entlastungskriechen

Dieses Kriechen wird als Belastungskriechen bezeichnet und wirkt sowohl bei Streckung (positiver Kraft) wie auch bei Stauchung (negativer Kraft) bis auf das Vorzeichen gleichermaßen. Die Zeitkonstante und Amplitude dieser Funktion, kann aus den Informationen der maximalen Abweichung durch Kriechen ΔE_{crl} und der dafür benötigten Zeit T_{crl} aus dem Datenblatt des Kraftsensors übernommen werden. Um Sprünge im Signal bei veränderter Krafrichtung zu vermeiden und diesen Prozess kraftabhängig zu modellieren, wird die Formel um einen normierten Faktor F erweitert.

$$\Delta E(t) = \frac{F}{F_{nenn}} * \Delta E_{crl} * (1 - e^{-\frac{5t}{T_{crl}}})$$

Formel 25 Formel Belastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s, F : Kraft in N, F_{nenn} : Nennkraft in N]

Somit ist die Abweichung durch Belastungskriechen bei der Nennkraft F_{nenn} maximal (ΔE_{crl}) und bei Ausbleiben der Kraft null.

Ist nach zeitlichem Anhalten einer gleichgerichteten Kraft und einem daraus resultierenden Kriechvorgang die Kraft wieder auf null abgeklungen oder hat seine Richtung geändert, kommt es zum sogenannten Entlastungskriechen. In diesem Fall springt die Dehnung nicht wieder abrupt auf null oder den neuen Wert zurück, sondern verläuft ebenfalls mit einer E-Funktion auf seinen neuen Endwert zurück (siehe Abbildung 88).

Der Betrag der Amplitude und die Zeitkonstante beim Entlastungskriechen sind dieselben, wie beim Belastungskriechen. Nur die Richtung der exponentiellen Veränderung des Messwerts wechselt.

$$\Delta E(t) = \frac{F}{F_{nenn}} * \Delta E_{crl} * e^{-\frac{5t}{T_{crl}}}$$

Formel 26 Formel Entlastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s, F : Kraft in N, F_{nenn} : Nennkraft in N]

Da sich das Zeit-System bei jeder Krafrichtungsänderung erneuert, muss dann auch t in der Berechnung immer wieder auf 0 gesetzt werden. Sowohl Belastungskriechen wie auch Entlastungskriechen wirken sowohl bei positiven als auch negativen Kräften. Somit können sich diese beiden Kriechvorgänge auch überlagern (siehe Abbildung 90).

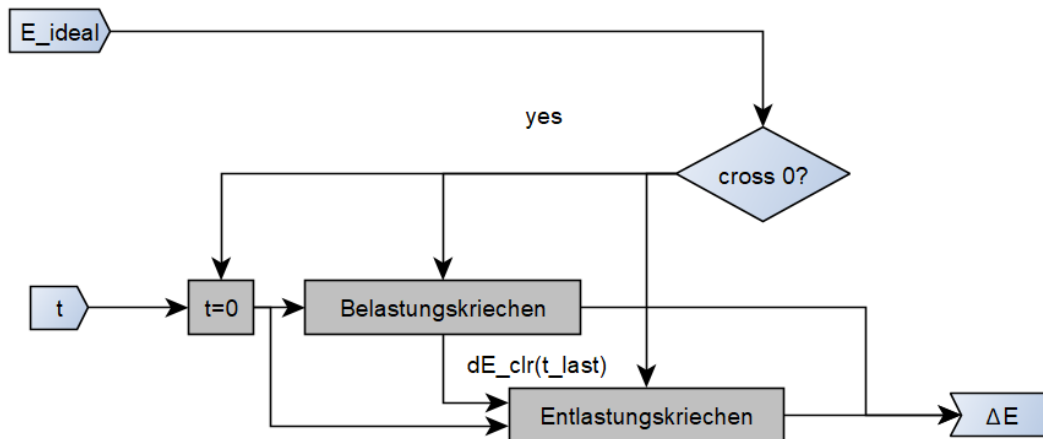


Abbildung 89 Signalflussplan Berechnung Abweichung durch Kriechen [$dE_{crl}(t_{last})$: Letzter Wert der Abweichung von E durch das vorherige Belastungskriechen zum Zeitpunkt des Lastwechsels]

Wechseln die Kraft bzw. die ideale Dehnung ihr Vorzeichen, wird die Zählzeit t auf 0 gesetzt und die E -Funktion der Abweichung durch das Belastungskriechen aus Formel 25 beginnt zu laufen mit dem Startwert 0. Diese läuft so lange weiter, bis das Vorzeichen der Kraft wieder wechselt. Ist dies der Fall, speichert der Algorithmus den letzten Wert der Abweichung $\Delta E_{crl}(t_{last})$ durch das Belastungskriechen. Dies ist nun der neue Startwert für die Kurve des Entlastungskriechens aus Formel 26, mit 0 als Endwert. Gleichzeitig wird t wieder auf 0 gesetzt und das neue Belastungskriechen nimmt ebenfalls seinen Lauf. Dieses Mal mit umgekehrten Vorzeichen.

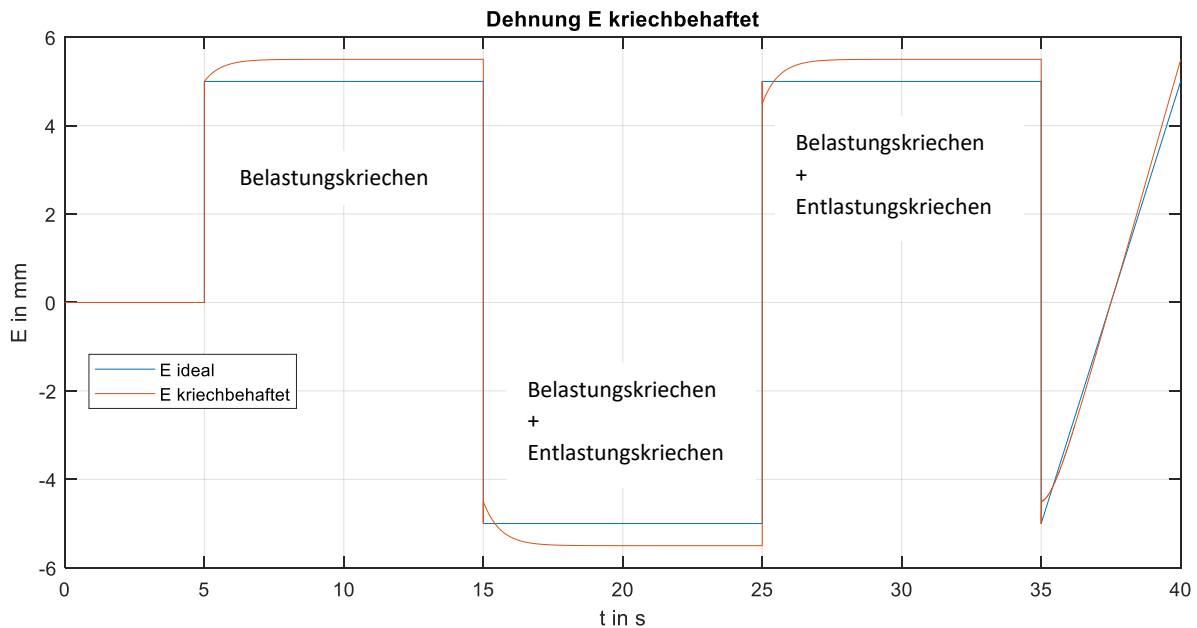


Abbildung 90 Dehnung E mit und ohne Kriechen (plakative Darstellung)

In dieser Simulation sind sowohl Kriechen als auch Zurückkriechen eindeutig zu erkennen. Auch hier mussten, um die Effekte zu verdeutlichen, die Parameter unrealistisch hoch gewählt werden (ΔE_{clr} bei Nennkraft: 0.5mm, T_{crl} : 3s).

Übersprechen der Kräfte aus verschiedenen Raumachsen (Querkrafteinfluss):

Bisher wurden nur Kräfte senkrecht zum Kraftaufnehmer betrachtet. Doch durch die Einbaulage des Sensors und dreidimensionale Wirkrichtungen der Kräfte, kann es auch zu Kräftekomponenten in Querrichtung zum Sensor kommen. Diese haben einen Einfluss auf die Messgröße. Ein Faktor, der den Einfluss der Querkräfte im Kraft-Sensormodell beschreibt, ist d_{qf} . Die Messabweichung, die dadurch entsteht, ist linear abhängig zur Querkraft und von d_{qf} modelliert.

$$\Delta F = d_{qf} * F_q$$

Formel 27: Abweichung durch Querkraft [ΔE : Abweichung der Dehnung in m, d_{qf} : Querkraft-Einflussfaktor, F_q : Querkraft in N]

In den meisten Datenblättern von Kraftsensoren ist d_{qf} in % der Nennkraft angegeben.

3.9.3 Physik-Fehlermodell

Als Fehlerszenario wurde hier der Abbruch des Federkörpers gewählt. Durch allmähliche Ermüdung des Materials nach jahrelanger Nutzung oder durch starke einmalige Überbelastung kann ein Kraftsensor zerstört werden. Dabei kann es zu keiner Dehnung mehr an den Stellen kommen, wo die DMS angebracht sind. Ein dauerhaftes Ausgangssignal von 0V ist die Folge.

3.9.4 Sensor-Technikmodell

Die Dehnungsmessstreifen und die H-Brücken-Schaltung werden als Black-Box System modelliert. Mit dem Eingangssignal E und dem Ausgangssignal u (analoge Sensor-Ausgangsspannung).

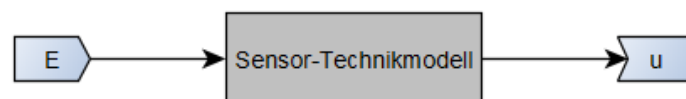


Abbildung 91 Blackbox Sensor-Technikmodell (Kraftsensor)

Dieses ideale Technikmodell besteht aus einer linearen Umrechnung der Dehnung E und einer Spannung u . Dieser Umrechnungsfaktor wird im Kraft-Sensormodell k-Faktor genannt.

$$u = E * k$$

Formel 28 Umrechnung Dehnung und Spannung [u: Ausgangsspannung in V, E: Dehnung in m, k: k-Faktor in V/m]

3.9.5 Technik-Störmodell

Folgende Phänomene wurden im Technik-Störmodell des Kraft- und Momentsensormodell implementiert:

- Rauschen
- Temperaturabhängigkeit

Rauschen:

Wie bei den Abstandssensoren auch, ist auch hier ein weißes Rauschen simuliert. In diesem Störsignal werden Phänomene wie, Bauteilrauschen der Widerstände und Verstärker, sowie Störsignale, verursacht durch elektromagnetische Kopplung, in den Kabeln und Sensor zusammengefasst.

Temperaturabhängigkeit:

Auch hier wurden eine temperaturabhängige Steigungsabweichung und ein temperaturabhängiger Offset implementiert. Die Berechnung der temperaturabhängigen Messabweichung ist analog zu der beim LVDT-Sensor (Formel 16 und Formel 17).

3.9.6 Technik-Fehlermodell

Folgende Fehlerszenarien wurden implementiert:

- Abfallen eines oder mehrerer DMS
- Spannungseinbruch der Speisespannung für die Messbrücke

Im Falle, dass alle Dehnungsmessstreifen abfallen, kann die Dehnung des Federkörpers nicht auf den DMS übertragen werden, somit kann auch kein Ausgangssignal erzeugt werden. Die Folge wäre, wie bei dem Bruch des Federkörpers auch ein dauerhaftes 0V Signal am Ausgang. Fällt nur eines der vier DMS ab, ist die H-Brücke nicht mehr bei $E=0m$ ausgeglichen. Eine Offsetspannung und eine veränderte Steigung der Kennlinie ist die Folge.

Der Pegel der Ausgangsspannung ist direkt gekoppelt mit dem Pegel der Speisespannung für die Messbrücke. Bricht diese zum Beispiel auf 50% ein, so kann auch die Spannung am Ausgang nur noch 50% seines ursprünglichen Nennwertes erreichen.

3.9.7 Digitalisierung-Technikmodell

Die Umwandlung der analogen Ausgangsspannung des Sensors in die digitale Spannung für die Auswertung erfolgt analog zum Digitalisierungsmodell vom LVDT-Sensor.

Das gesamte Kraft-Sensormodell wird als Simulink Library-Block gespeichert und mit Hilfe einer Maske können die Parameter aus Datenblättern von echten Kraft-Sensoren eingelesen werden.

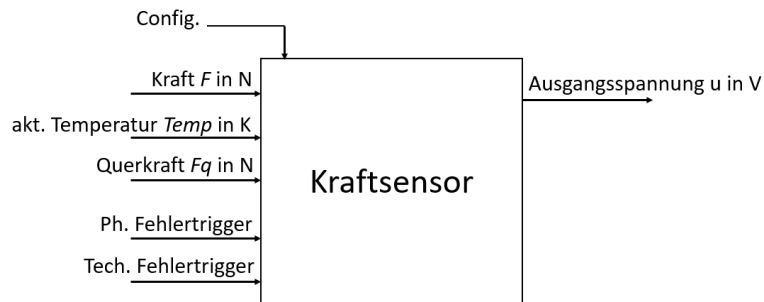


Abbildung 92 Kraft-Sensormodell Library-Block

Diese Darstellung zeigt das Modell mit allen Ein- und Ausgangssignalen

3.10 Integration der Sensormodelle in die Co-Simulation

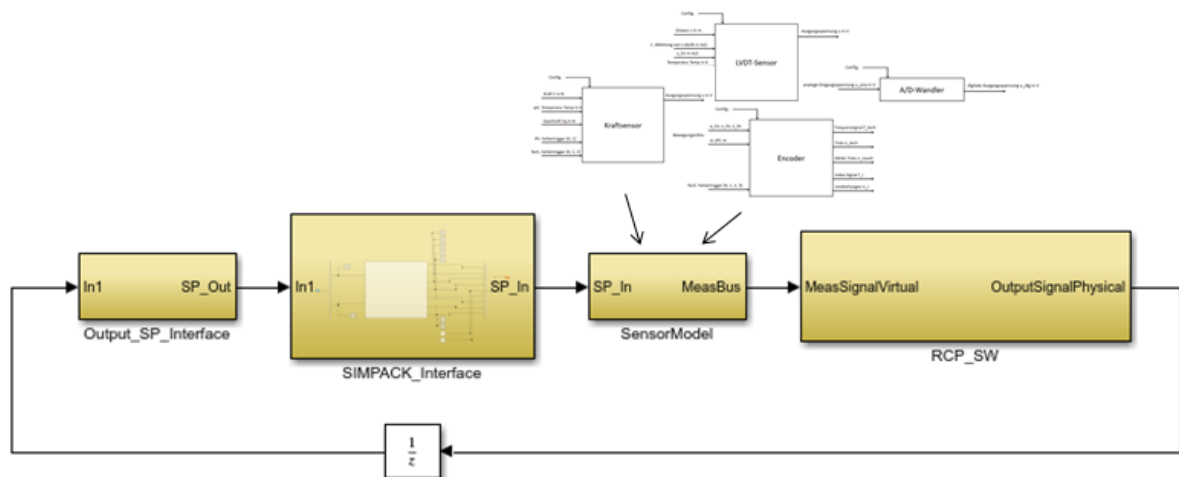


Abbildung 93 Einfügen der Sensormodelle in die Co-Simulation

Da die Modelle der Sensorschnittstelle nun vorliegen, müssen diese noch in die Co-Simulationsumgebung eingebunden werden. Die Eingangsgrößen der Sensormodell-Blöcke werden aus dem Mehrkörpersimulation des NGT-FuN Integrationsprüfstands herausgeleitet. Dabei werden für die zu messenden physikalischen Größen, wie Winkel, Distanzen und Kräfte direkt und indirekt Ausgangssignale aus der MKS angelegt.

3.10.1 Anlegen von Ausgangssignalen in Simpack für die Simat-Schnittstelle

Während dem Simulationsablauf werden die Messgrößen intern in Simpack berechnet. Damit diese an die Simulink-Seite abgegeben werden können, müssen im Simpack-Mehrkörpermodell für diese Signale Ausgänge angelegt werden.

Kräfte können einfach aus den Kraftelementen oder Gelenken im Simpack-MKS Modell als Y-Ausgangssignale herausgeleitet werden. Bei der Messung der Distanzen müssen zuerst Marker an den mechanischen Komponenten gesetzt werden, wo sich die Anfangs- und Endpunkte befinden, welche die Distanz definieren. Bei einer von einem LVDT-Sensor gemessenen Distanz muss der direkte Weg (Magnitude) zwischen den Marker ausgegeben werden, da der LVDT-Sensor mit Kugelgelenken an beiden Objekten befestigt ist, von denen der Abstand gemessen werden soll.

Bei einem Lasersensor ist nur der Anfangspunkt ortsfest. Der Laserstrahl geht immer nur lotrecht vom Emitter aus. Der Endpunkt ist nicht an einem festen Punkt des gegenüberliegenden Objektes gebunden, da sich das Objekt auch senkrecht zu dem Laserstrahl bewegen kann ohne, dass der Sensor einen anderen Wert anzeigt.

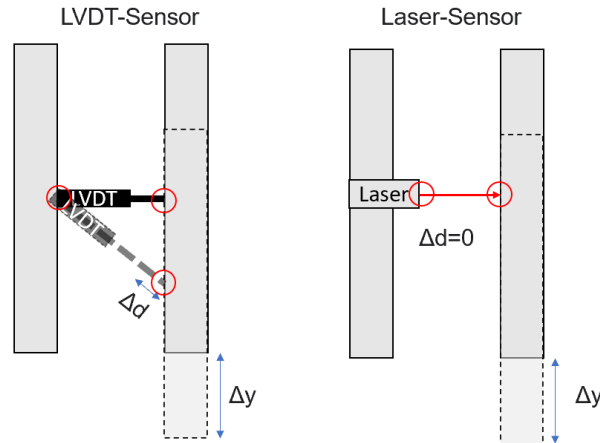


Abbildung 94 Veränderung der gemessenen Distanz d bei Querverschiebung des Objekts [rote Kreise stellen die Marker dar]

Um eine Distanz ausgeben zu können benötigt man jedoch aber immer zwei Marker. Dieses Problem wurde gelöst in dem das Ausgangssignal nicht die Magnitude der beiden Marker abbildet, sondern eine spezielle Expression (Zusammenhang oder Funktion) gebildet wird. Dabei wird nur die Richtungskomponente des Wegs verwendet, in welche der Laserstrahl zeigt. Da sich der Sensor aber ebenfalls bewegen kann, ist es wichtig nicht ein globales Koordinaten-Bezugssystem zu wählen, sondern das Koordinatensystem vom Anfangspunkt-Marker.

Diese Expression kann mit den Funktionen DX , Dy und DZ in Simpack realisiert werden:

$DY(\$M_1, \$M_2, \$M_1)$ //y-Abstand zwischen M_1 und M_2

Diese Expression wird wie folgt gelesen: Distanz in y-Richtung zwischen Marker M_1 und Marker M_2 im Koordinatensystem von Marker M_1 .

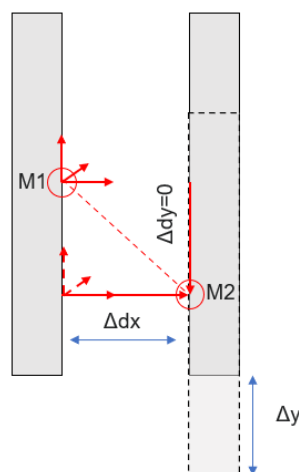


Abbildung 95 Distanzmessung zwischen 2 Marker M_1 und M_2 in nur einer Koordinatenachse (Bezug M_1)

3.10.2 Problem des Nichtvorhandenseins einiger Sensorpositionen im Simpack-Modell

Einige Sensorgrößen konnten nicht 1:1 aus dem Simpack-Modell übernommen werden, da die Positionierung der einzelnen Sensoren nicht im Simpack-Mehrkörpermodell modelliert worden sind.

Aus Übersichtlichkeitsgründen werden nicht alle Sensorgrößen, welche indirekt bestimmt werden müssen, im Rahmen der schriftlichen Arbeit beschrieben, sondern nur zwei Beispiele:

- Kräfte an den Radlagern
- Drehwinkel des Halters für die Primärfedern

Kräfte an den Radlagern:

Beide Räder sind jeweils mit zwei Lagern an dem Radträger verbunden. In der Mehrkörpersimulation wurde nur ein Lager modelliert, auf welches Kräfte und Momente herrschen. Aus diesen Informationen, wird berechnet, welche Kräfte/Momente auf die beiden Radlager (innen und außen) wirken würden.

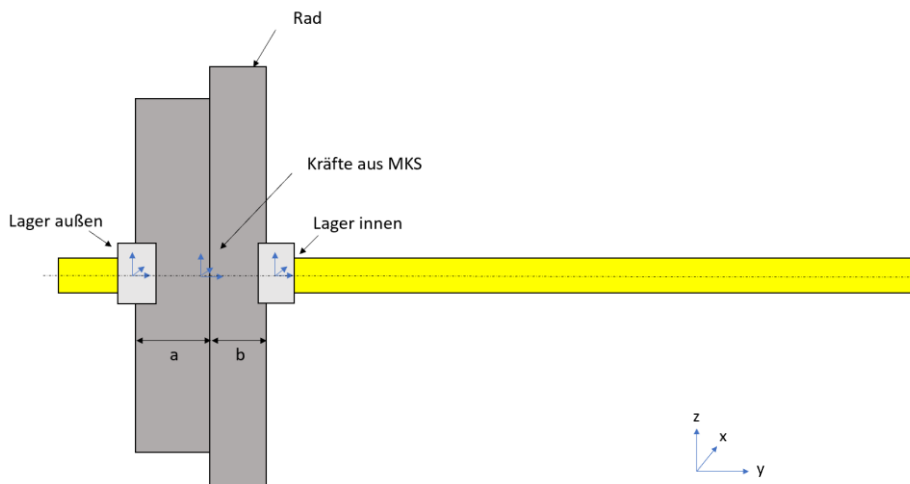


Abbildung 96 Skizze Radlager (Innen- und Außenlager) a und b beschreiben die Abstände der Lager zu dem virtuellen Lager der MKS

Durch Kräfte- und Momentengleichgewicht in x-, y- und z-Richtung kann ein Gleichungssystem aufgestellt und die Lagerkräfte bestimmt werden:

$$F_{Ax} = \frac{b}{a+b} F_x \quad F_{Az} = \frac{b}{a+b} F_z$$

$$F_{Bx} = \frac{a}{a+b} F_x \quad F_{Bz} = \frac{a}{a+b} F_z$$

$$F_{Ay} = F_{By} = \frac{F_y}{2}$$

Formel 29 Berechnung der Lagerkräfte in den Radlagern

Drehwinkel des Halters für die Primärfedern:

Ein weiteres Beispiel für eine indirekt bestimmte Sensorposition ist der Drehwinkel des Halters für die Primärfedern am Radträgers um die z-Achse.

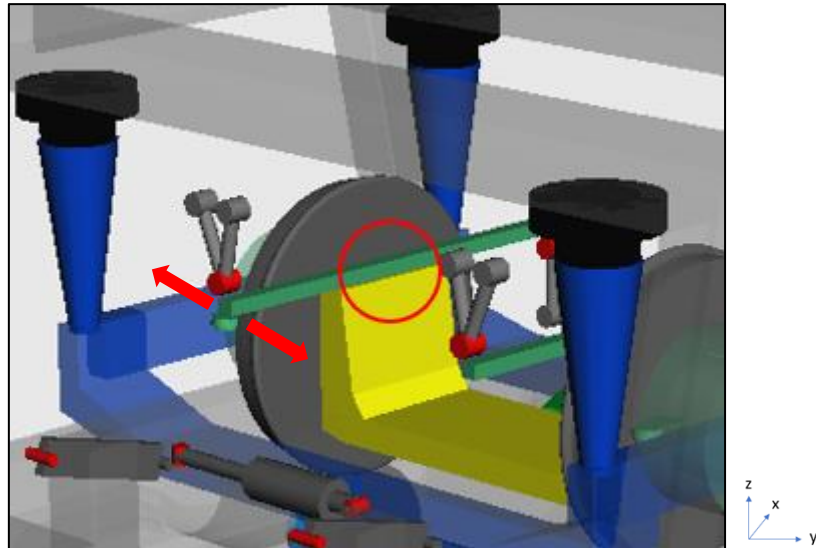


Abbildung 97 Abschnitt aus Simpack-Modell vom NGT-FuN [rote Markierung: Halter für Primärfedern]

Der Drehwinkel γ kann direkt aus der Mehrkörpersimulation herausgeleitet werden. Dieser wird in der Praxis aber mittels LVDT-Sensoren gemessen, wie in Abbildung 98 zu sehen ist.

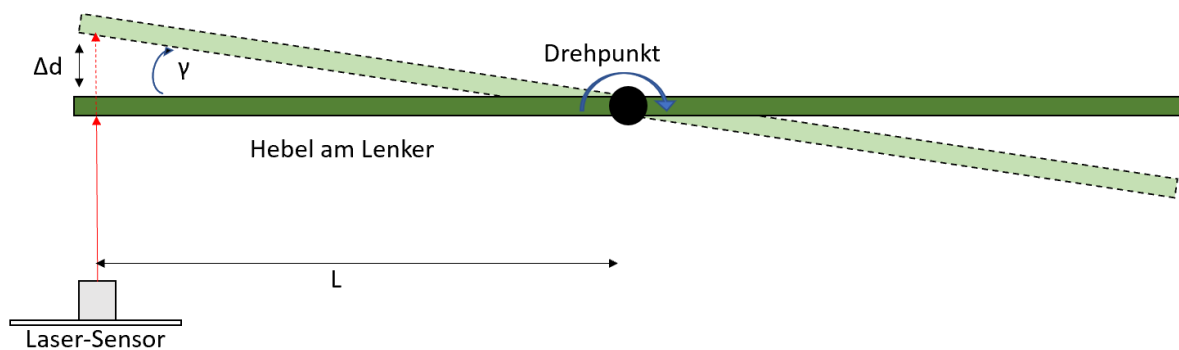


Abbildung 98 Messung von γ mit LVDT-Sensor

Mit Hilfe der Hebellänge L und dem Winkel γ kann dann die notwendige Distanz, welche der Sensor messen würde, berechnet werden.

$$\Delta d = L * \sin(\gamma)$$

Formel 30 Berechnung des Messwerts vom LVDT-Sensor zur Bestimmung von den Drehwinkel γ der Primärfeder

Auf diese Art wurden einige Messgrößen aus anderen Größen im Simpack-Modell abgeleitet, um rechnerisch auf die reale Sensorposition zu schließen. Diese mechanischen Berechnungen lassen sich in der Sensormodellstruktur zum Sensor-Physikmodell zuordnen, da sie das ideale Verhalten des Sensors mit abbilden.

3.10.3 Problem der Eliminierung einiger Variablen/Zustände

Der Solver, welcher die Mehrkörpersimulation in Simpack verwendet, führt während der Berechnung der Zustände und Variablen interne Optimierungen durch. Einige dieser Optimierungsvorgänge sorgen dafür, dass Zustände oder Variablen, welche nicht zwingend notwendig für die Berechnung der Zustandsgrößen in der MKS notwendig sind oder durch andere Zustände oder Variablen definiert werden können, eliminiert werden, um die Rechenzeit zu verkürzen. Jedoch sind einige dieser Variablen auch Messgrößen, die im realen System mit Sensoren erfasst werden. Da diese Werte nicht berechnet werden, kann die Sensorik-Schnittstelle der Co-Simulation diese nicht weiterverarbeiten.

Ein Beispiel für dieses Problem stellt die, vom Encoder gemessene Drehzahl und gemessener Winkel eines Rades bzw. der Rolle dar. Für die Simulation verwendet Simpack pro Rad/Rolle nur entweder die Drehzahl oder den Winkel. Die jeweilige andere Größe wird nicht berechnet (kein Signal wird an die Simat-Schnittstelle abgegeben). Ursache dafür ist, die Tatsache, dass die eine Größe sich immer durch Integration oder Differentiation in die andere umrechnen lässt. Beheben lässt sich das Problem, in dem explizite Expressions in die Simulation eingebunden werden, welche die fehlenden Variablen oder Zustände in ihrer Definition beinhalten. Dadurch berücksichtigt und berechnet der Solver diese und es wird ein Signal erzeugt.

Mögliche Expression bei einem fehlenden Winkelgeschwindigkeitssignal ω :

$$out.\omega = 1 * \omega_{sim}$$

Formel 31 Expression für einen eliminierten Zustand ω [out. ω : Ausgangsgröße der Drehzahl, ω_{sim} : eliminierte Zustandsgröße]

Sind alle notwendigen Ausgangssignale aus der Mehrkörpersimulation korrekt herausgeleitet und durch die Simat-Schnittstelle in die Co-Simulation eingefügt worden, werden alle Signale, die auch im Realen Prüfstand gemessen werden würden, mit Sensormodellen aus der Bibliothek versehen.

3.11 Der Lateralregler im NGT FuN (Spurführung)

Eine Anwendung für die Sensorik und ein Bestandteil des RPC-Systems in Simulink ist der Lateralregler, welche die Spurführung des Fahrwerks ermöglicht. Der in Kapitel 2.4.3 erwähnte, Selbstzentrierungseffekt findet bei Einzelradfahrwerken nicht statt. Aus diesem Grund ist eine aktive Lenkvorrichtung vorhanden, die mit Hilfe von Variation der Radmomente links und rechts eine Gier-Beschleunigung verursacht. Ein dafür konzipierter Lateral-Regler sorgt für eine gleichmäßig zentrierte Fahrt der Räder auf den Schienen, um so Verschleiß zu verringern und die Betriebsdauer des Fahrwerks zu steigern. Bei diesem Lateralregler handelt es sich um einen P-Zustandsregler mit einem Soll-Gier-Winkel und einer lateralen Soll-Position als Führungsgröße und drei weitere Eingangsgrößen (Geschwindigkeit, Ist-Gier-Winkel und laterale Ist-Position). Stellgrößen bilden zwei Motormomente für das linke und rechte Rad.

Folgende Abbildung zeigt die Ein- und Ausgänge einer vereinfachten Darstellung des Lateralreglers:

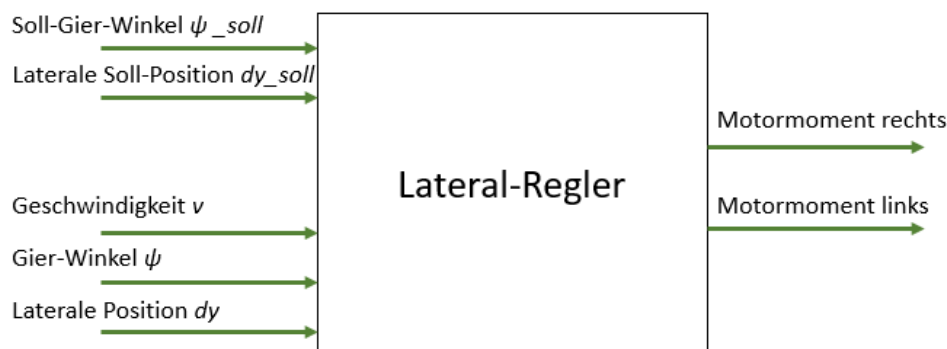


Abbildung 99 Ein- und Ausgänge Lateralregler (vereinfacht)

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Eingangssignale bestimmt werden:

Die Geschwindigkeit:

Die (Radumfangs)Geschwindigkeit wird mit Hilfe der Pulsfrequenzen der beiden Encoder an den Rädern berechnet:

$$v_x = \frac{f * 2\pi * r_{wheel}}{m_z}$$

Formel 32 Berechnung der Fahrgeschwindigkeit v_x [f: Frequenzsignal des Encoders in HZ, m_z : Zähnezahl vom Encoder, r_{wheel} : Radius Rad]

Für die Bestimmung der Geschwindigkeit werden die Radumfangsgeschwindigkeiten der Räder links und rechts gemittelt.

Die Laterale Position der Räder zur Schiene/Rolle:

Die laterale Position dy ist die primäre Regelgröße des Reglers. dy beschreibt die Verschiebung zwischen Rad und Rolle in y-Richtung. Sowohl der Radträger als auch der Fahrwerksrahmen sind in y-Richtung gegenüber dem Prüfstandsrahmen und somit auch gegenüber der Rolle, aufgrund der gefederten Lagerung, verschiebbar. Um die laterale Verschiebung von Rad (bzw. Radträger) und Rolle (bzw. Prüfstandsrahmen) bestimmen zu können, muss der Abstand zwischen dem Radträger und dem Fahrwerksrahmen und der Abstand zwischen Fahrwerksrahmen und Prüfstandsrahmen in y-Richtung addiert werden.

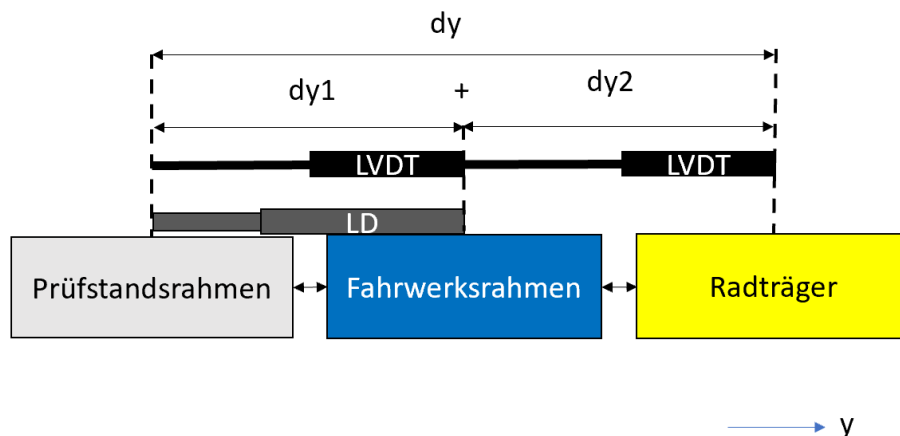


Abbildung 100 Bestimmung von dy aus 2 LVDT-Abstandssensoren

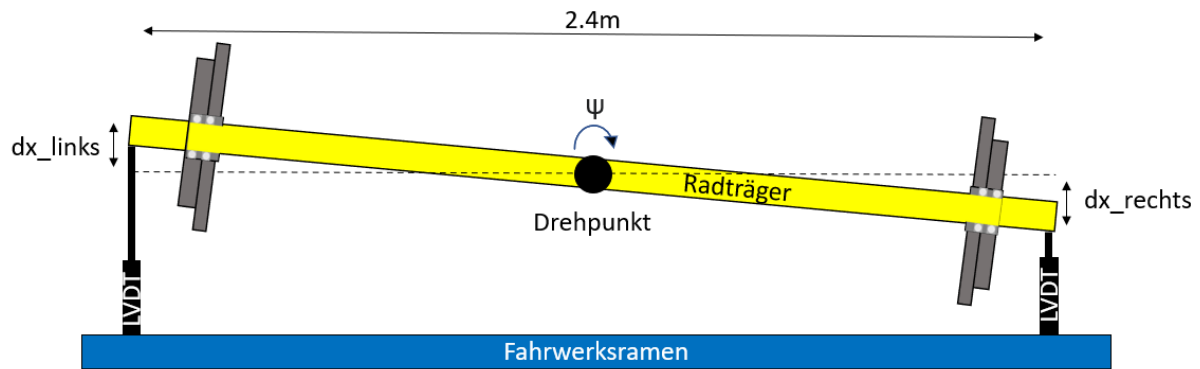
Zur Bestimmung von der lateralen Position dy werden die Signale von zwei LVDT-Abstandssensoren ausgewertet.

- LVDT-Abstandssensor zwischen dem Radträger und dem Fahrwerksrahmen
- LVDT-Abstandssensor zwischen dem Fahrwerksrahmen und dem Prüfstandsrahmen am Lateraldämpfer

Die Positionen dieser sind Abbildung 39 zu entnehmen ($Y1$ und $Y2$).

Der Gier-Winkel:

Der Gier-Winkel ψ ist eine weitere Regelgröße und wird indirekt über zwei LVDT-Sensoren an den Rändern vom Radträger gemessen. Die Positionen der LVDT-Sensoren sind ebenfalls auf Abbildung 39 zu erkennen ($X1$ und $X2$).

Abbildung 101 Gier-Winkel ψ mit Abstandsmessung an den Rändern des Radträgers

Der Gier-Winkel ψ wird wie folgt berechnet:

$$\psi = \tan \frac{dx_{links} - dx_{rechts}}{2.4m}$$

Formel 33 Berechnung Gier-Winkel ψ in rad aus LVDT-Messwerten

Die von den Sensoren gemessenen Ist-Werte von dy und ψ werden mit vorgegebenen Soll-Werten (Führungsgrößen) verglichen und ein Regelalgorithmus berechnet anschließend die nötigen Stellgrößen. In dem Fall beeinflusst der Regler die Motormomente an den rechten und linken Rädern so, dass der laterale Versatz ausgelöscht wird, ein fester lateraler Versatz beziehungsweise ein fester Gier-Winkel gehalten wird oder der Versatz bzw. der Gier-Winkel eine vorgegebene Bahn abfährt. Bei der für diese Arbeit verwendeten Version des Lateralreglers wird ein P-Zustandsregler verwendet.

4 Test der Co-Simulationsumgebung mit Sensorsimulation anhand realistischer Simulationsszenarien

In diesem Abschnitt der Arbeit wird die bisher erarbeitete Simulationsumgebung und die Sensorschnittstelle anhand realistischer Szenarien getestet. Dabei werden konkrete Sensoren verwendet und ihre Daten von den Datenblättern in die Parametermasken der Sensormodelle eingetragen, sodass eine virtuelle Inbetriebnahme des NGT-FuN Integrationsprüfstands ermöglicht wird. Die Sensoren und Parameter, welche für die nachfolgenden Simulationen verwendet wurden, sind dem Anhang IV zu entnehmen. Für Parameter, welche nicht in den Datenblättern aufgeführt sind, wurden realistische Werte angenommen.

Begonnen wird mit den Sensorsimulationen von Encoder, LVDT- und Kraftsensor und der Visualisierung ihrer physikalischen und technischen Stör- und Fehlerphänomene (Kapitel 4.3). Anschließend wird in Kapitel 4.4 die clock-Frequenz-abhängige Auflösung des Encoders anhand des Rad-Rolle Schlupfes untersucht. In Kapitel 4.5 wird abschließend das Regelverhalten der Spurführung bei Simulationen mit und ohne Sensorschnittstelle verglichen und die Auswirkungen der Sensorsimulation veranschaulicht.

4.1 Aufbau der Co-Simulationsumgebung

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, wurde für jede Sensorposition an dem Integrationsprüfstand in der Mehrkörpersimulation in Simpack ein passender Ausgang erstellt.

Abbildung 102 zeigt einen Ausschnitt aus dem Model-Tree in Simpack in dem einige Ausgangssignale (y-Outputs) zu erkennen sind:

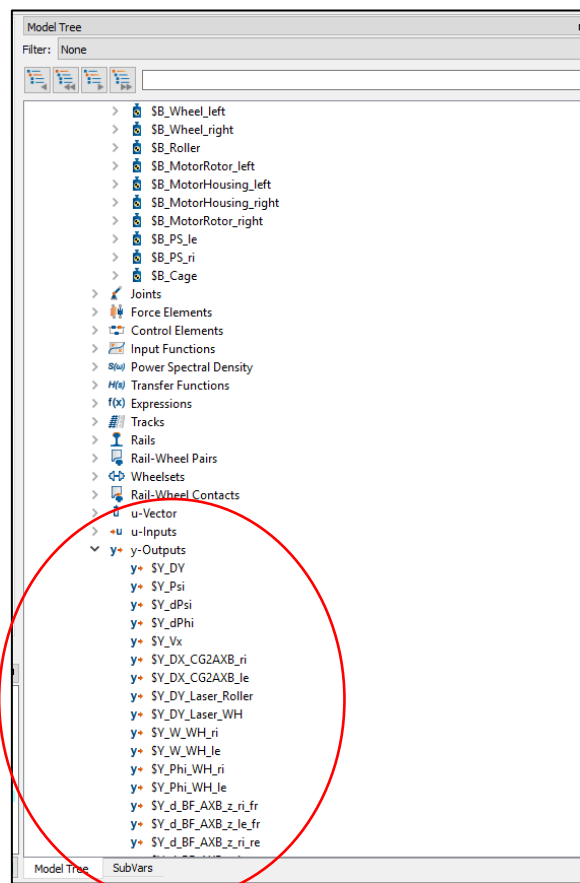


Abbildung 102 Screenshot Simpack Model-Tree

Diese Signalausgänge sind auch die Ausgänge des Simat-Blocks in Simulink.

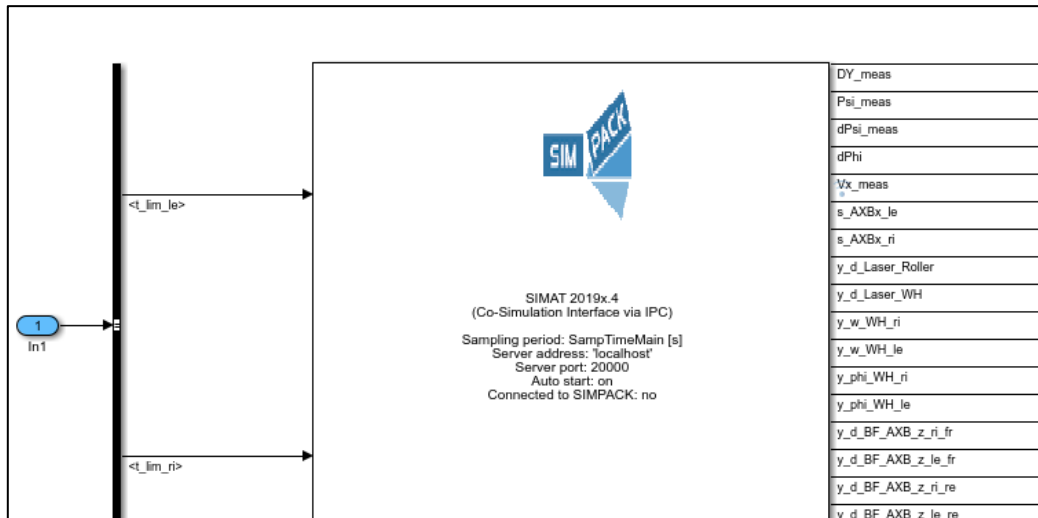


Abbildung 103 Screenshot Ausschnitt Simat-Block mit den idealen physikalischen Sensorsignalen

Für alle Sensorpositionen im NGT-FuN Integrationsprüfstand wurden Sensorsignalausgänge für virtuelle Drehzahl-, Distanz-, Kraft- und Momentmessungen sowohl für Funktionssensorik als auch für Referenzsensorik erzeugt. Die Eingänge des Simat-Blocks sind die Momente für die Motoren am linken und rechten Rad. Diese werden im RCP-System in Simulink erzeugt.

Der Aufbau der Simulink-Simulationsumgebung erfolgt nach der Beschreibung in Kapitel 3.2.

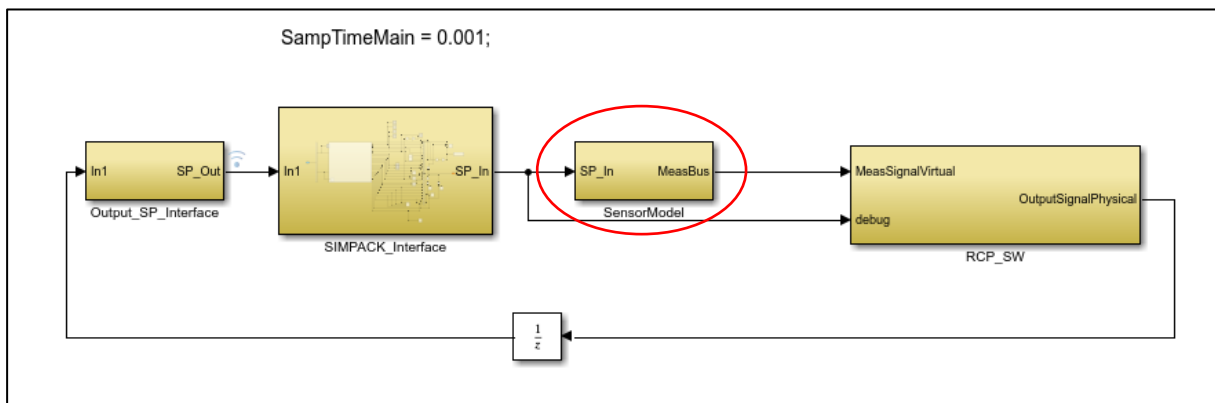


Abbildung 104 Screenshot Co-Simulationsumgebung Simulink

Alle idealen physikalischen Ausgangssignale der Simpack-Simulationsumgebung werden in einen Signalbus zusammengefasst und an die Sensorik-Schnittstelle *SensorModell* (roter Markierung in Abbildung 104) weitergeleitet.

Die Sensorschnittstelle beinhaltet die Modelle aller Sensoren, welche im Prüfstand verwendet werden. Die Sensormodelle wandeln die idealen physikalischen Signale in reale technische Sensorsignale um. Diese werden wieder zu einem Bus zusammengefasst und an das RCP-System geleitet. Ein Ausschnitt der Sensorik-Schnittstelle befindet sich in Abbildung 105:

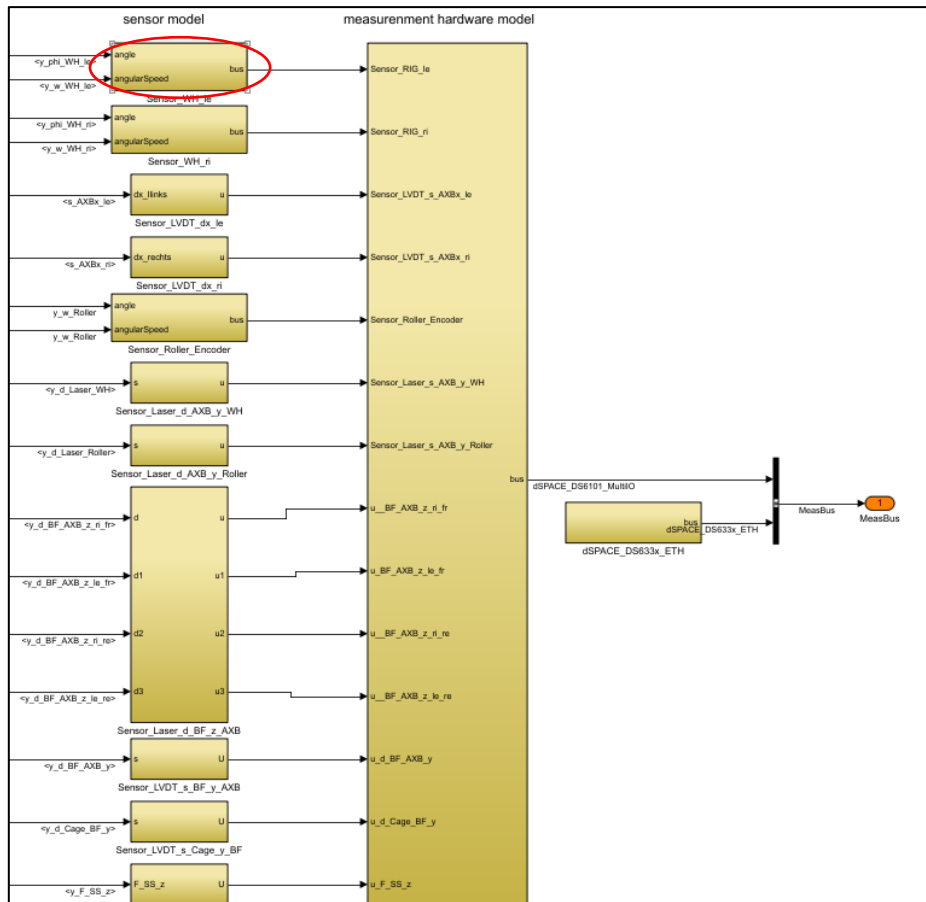


Abbildung 105 Screenshot Ausschnitt Sensorschnittstelle

Jedes ideale physikalische Ausgangssignal aus dem Simat-Block wird mit einem Sensormodell versehen. Die implementierten Sensormodelle wurden zuvor in Modellbibliotheken abgelegt.

Folgender Screenshot zeigt die Implementierung des Sensormodells für den Encoder am linken Rad (roter Markierung in Abbildung 105):

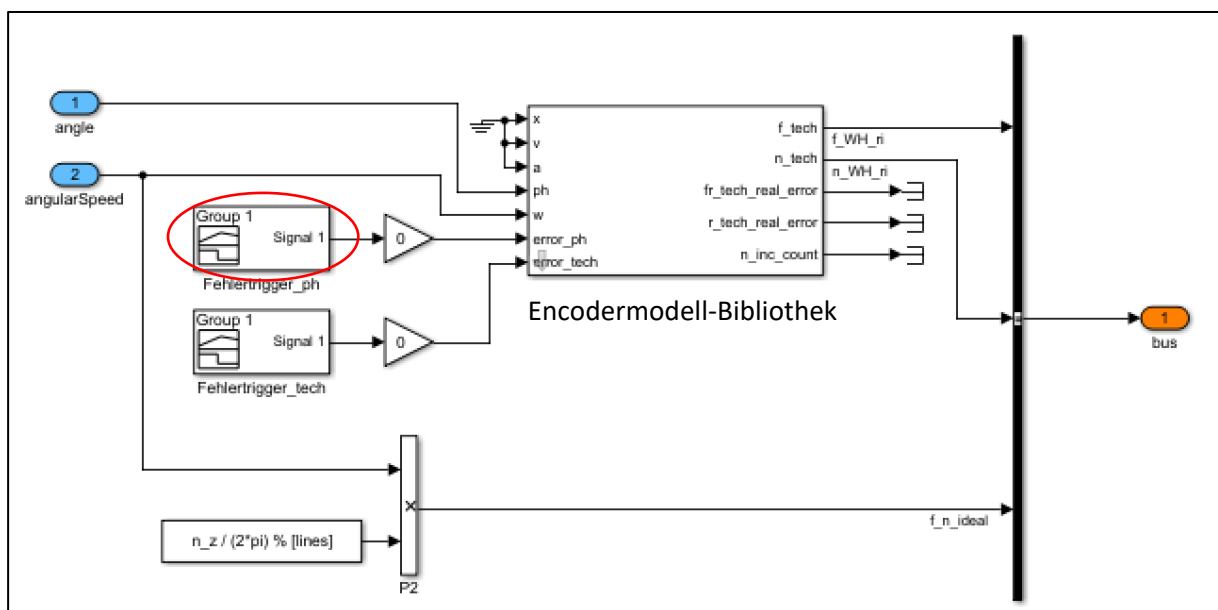


Abbildung 106 Screenshot Encodermodell

Die idealen Signale von dem laufenden Radwinkel φ und der Winkelgeschwindigkeit ω aus der MKS gelangen in das Sensormodell und dieses berechnet daraus die idealen technischen Signale der Pulsfrequenz f und der Pulszahl n . Zum Simulieren von Fehlerszenarien sind vor allen Sensormodellen zusätzliche Signalquellen eingefügt (roter Markierung in Abbildung 106). Diese erzeugen diskrete Rechtecksignale für zeitliche Trigger. Die Höhe der Rechteckflanken bestimmt die Art des Fehlers, welcher simuliert werden soll.

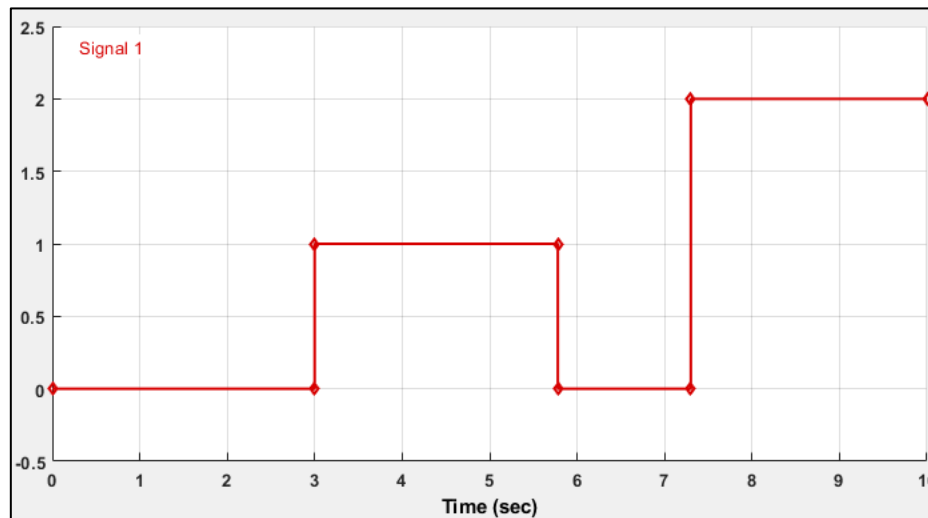


Abbildung 107 Fehler-Trigger-Signal Fehlerszenario 1: Wert: 1, Fehlerszenario 2: Wert: 2

In diesem Beispiel wurden 2 verschiedene Fehler zu verschiedenen Zeiten simuliert.

4.2 Simulationsszenarien

Für die Simulationsexperimente in diesem Kapitel, wird die Co-Simulationsumgebung, wie sie in Kapitel 4.1 beschrieben ist, aufgebaut. Für die Sensormodelle werden die Konfigurationen und Parameter gewählt, die in den Datenblättern der Sensoren zu finden sind, welche auch im späteren realen Aufbau des NGT-FuN Integrationsprüfstand in Verwendung sein werden. Aus diesen realistischen Sensormodellen und der Co-Simulationsumgebung bestehend aus der Mehrkörpersimulation in Simpack und der Signalerarbeitung in Simulink leiten sich realistische Simulationsszenarien ab. Simulationsexperimente anhand dieser Szenarien stellen die Funktionalität der, in dieser Arbeit erstellten, Sensormodelle dar.

Es wurden zwei Simulationsszenarien verwendet:

- Gesamtprüfstand vom NGT-FuN bei lateraler Sprungantwort
- Encodermodell mit konstantem Geschwindigkeitssignal von 400km/h am Eingang

4.2.1 Gesamtprüfstand vom NGT-FuN bei lateraler Sprungantwort

Dieses Szenario umfasst die gesamte Co-Simulationsumgebung. Die Mehrkörpersimulation der Prüfstandsmechanik in Simpack und die Signalverarbeitung in Simulink inklusive der Sensorik-Schnittstelle.

Es wird eine laterale Führungssprungantwort simuliert. Eine provisorische Version des Lateralreglers ermöglicht ein stabiles Dynamikverhalten des Gesamtsystems und erzeugt eine Stellgröße, welche dafür sorgt, dass die laterale Verschiebung (Regelgröße) dem Führungssprung folgt. Der Aufbau des Lateralreglers ist in Kapitel 3.11 beschrieben. Da am Anfang der Simulation ein, durch die Simulationsumgebung selbst verschuldetes Einschwingverhalten zu beobachten ist, muss der Zeitpunkt für den Führungssprung erst nach 4s Simulationszeit gewählt werden. Für die

Führungsgröße des Lateralreglers wird dabei ein Sprungsignal von 5mm lateraler Verschiebung dy_{soll} gegeben. Der Regler gibt daraufhin ein Stellmoment an die Mehrkörpersimulation des Fahrwerkprüfstands aus. Eine Verschiebung des Radträgers und der Räder ist die Folge. Während der gesamten Simulationszeit für dieses Szenario beträgt die Soll-Umlaufgeschwindigkeit der Räder 8.8km/h. Dabei werden ideale physikalische Signale der MKS ohne Sensorsimulation als Eingänge des Reglers verwendet.

Folgender Plot stellt die Sprungantwort von dy dar:

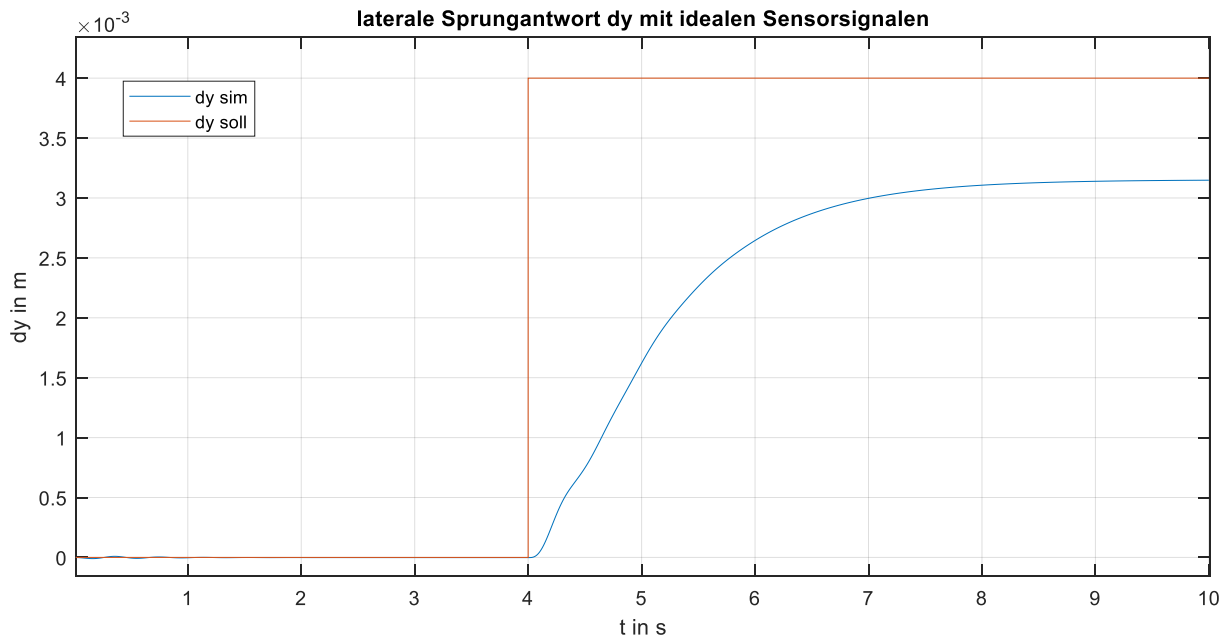
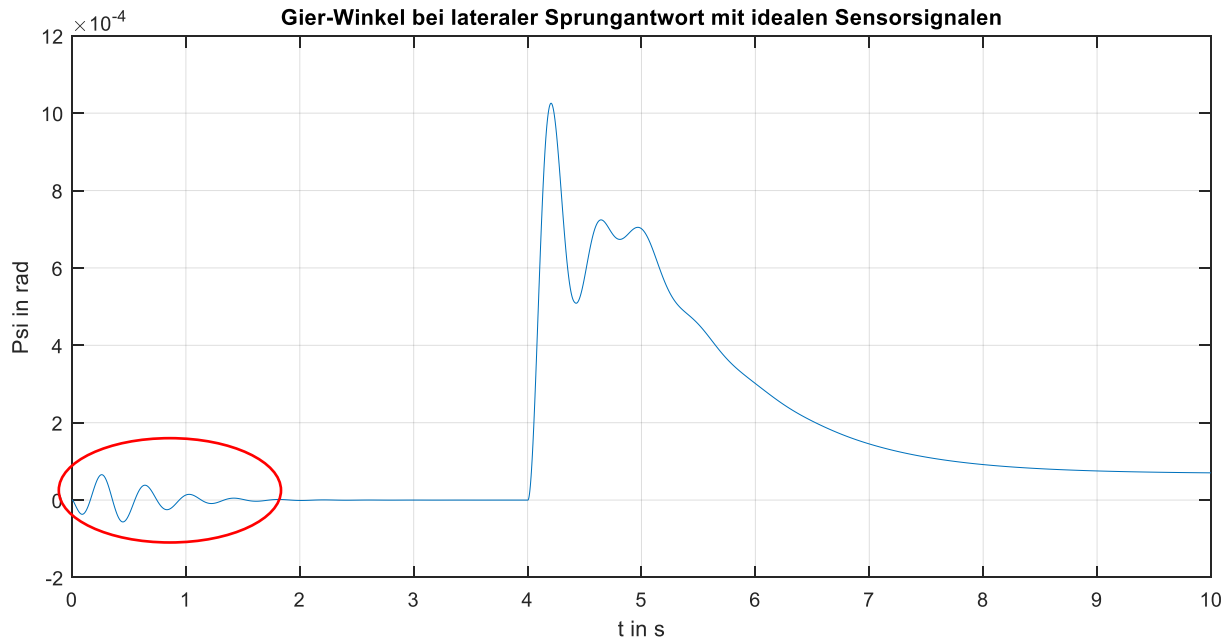


Abbildung 108 Simulation laterale Sprungantwort dy

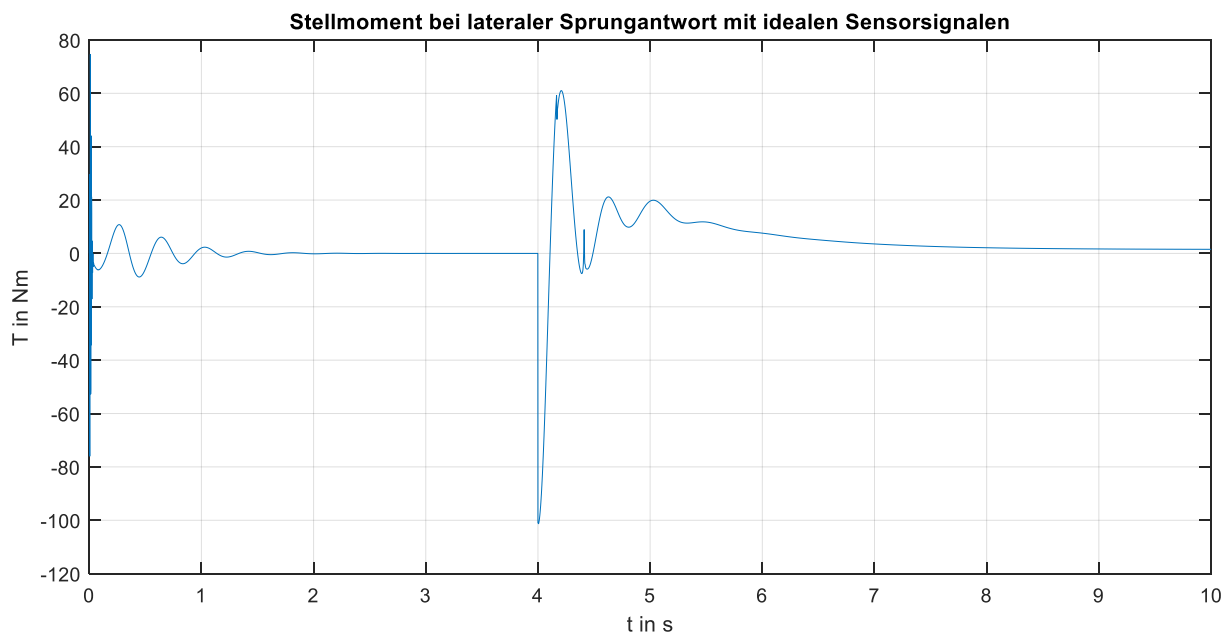
Da es sich bei dem Lateralregler um einen P-Zustandsregler ohne integralen Anteil handelt, ist keine stationäre Genauigkeit zu erwarten. Der Regelfehler wird nur auf einen festen Endwert ungleich 0 gehalten.

Mit einer Verschiebung in y -Richtung geht auch immer eine Veränderung des Gier-Winkels des Radträgers und der Räder mit her:

Abbildung 109 Simulation laterale Sprungantwort ψ

Das anfängliche Einschwingverhalten von ψ (*rote Markierung*) ist der Simulation geschuldet und somit kein reales physikalisches Phänomen. Der für das Systemverhalten aussagekräftige Zeitabschnitt ist somit ab dem Sprung bei $t=4\text{s}$ bis zum Ende der Simulation $t=10\text{s}$. Der Gier-Winkel ist Ursache einer lateralen Verschiebung des Fahrwerks. Zum Zeitpunkt des Sprungs steigt der Gier-Winkel um etwa 0.1 Millirad an. Das Fahrwerk macht dementsprechend eine Kurve auf der Rolle (ψ ungleich 0). Eine laterale Verschiebung zwischen den Rädern und der Rolle ist die Folge. Ist eine gewisse Verschiebung erreicht, lenkt das Fahrwerk wieder auf $\psi = 0^\circ$ zurück. Die laterale Position der Räder bleibt dabei auf dem neuen Wert erhalten. Bis zum Zeitpunkt $t=10\text{s}$ ist der Winkel nicht wieder auf 0 zurückgekehrt.

Folgende Darstellung zeigt den Stellgrößenverlauf des Reglers:

Abbildung 110 Simulation laterale Sprungantwort T

Das Stellmoment ist der Momentunterschied zwischen den beiden Motoren an den Rädern links und rechts am Radträger. Ab $t=4s$ steigt das Stellmoment an und ist die Ursache für die Änderung des Gier-Winkels ψ und somit der lateralen Verschiebung dy . Das Stellmoment gibt auch Auskunft auf die Energie, welche benötigt wird, um die gewünschte laterale Verschiebung zu erreichen bzw. zu halten.

Der nachfolgende Plot bildet die Umfangsgeschwindigkeit des linken Rades ab.

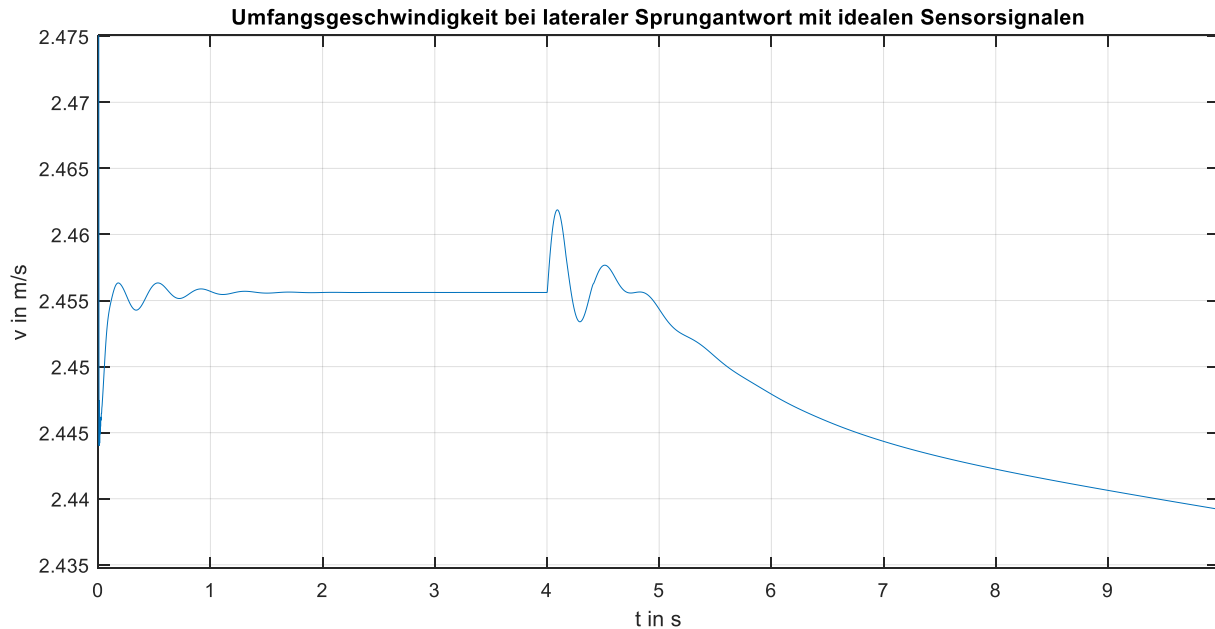


Abbildung 111 Simulation laterale Sprungantwort v

Die Umfangsgeschwindigkeit des Rades bleibt über die gesamte Zeit der Simulation bei etwa 8.8km/h (2.45m/s). Nach dem lateralen Sprung fährt das Fahrwerk eine leichte Rechtskurve auf der Rolle. Dadurch nimmt auch die Drehzahl des linken Rades etwas ab. Die Geschwindigkeit nimmt solange ab, bis der Gier-Winkel auf 0 zurückkehrt, was in den ersten 10s Simulationszeit noch nicht geschieht.

Es gelten für die globalen Simulationsparameter folgende Werte:

Parameter	Wert
Fahrtgeschwindigkeit v	2.45m/s
Schrittweitensteuerung	Fixed-Step (0.001s)
Simulationszeit	10s
Anfangswinkel ψ_0	0°
Anfangsverschiebung lateral dy_0	0m

Tabelle 8 globale Simulationsparameter

4.2.2 Encodermodell mit konstantem Geschwindigkeitssignal von 400km/h als Eingang

Der Integrationsprüfstand und dessen Simulationsumgebung sind nur für geringe Geschwindigkeiten bis ca. 20 Km/h ausgelegt. Für Simulationen mit Radumfangsgeschwindigkeiten von 400km/h, für welches das Fahrwerk in der Anwendung ausgelegt ist, eignet sich das oben beschriebene Szenario daher nicht und es muss folgendes Szenario verwendet werden.

Bei diesem Simulationsszenario wird keine Mehrkörpersimulation oder Signalverarbeitung verwendet. Es wird nur das Encodermodell separat betrachtet. Ein konstantes Geschwindigkeitssignal von 400km/h dient dabei als Eingang für das Encodermodell. Das Modell

wandelt dieses Geschwindigkeitssignal in ein Frequenzsignal um, welches wieder in eine Geschwindigkeit zurückgerechnet wird.

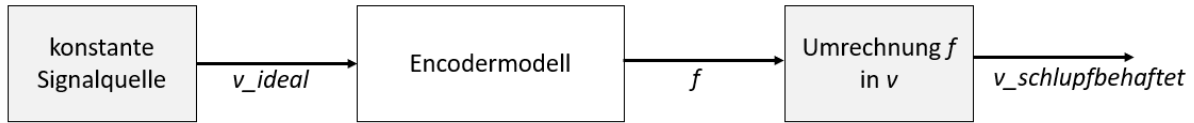


Abbildung 112 Aufbau des Simulationsszenarios

Dieses Szenario wird verwendet, um die endliche Auflösung des Encoders bei der Untersuchung des Schlupfes zwischen Rad und Rolle darzustellen. Kapitel 3.6.5 beschreibt, wie die Wertauflösung des Encoders von der Drehzahl und von der Frequenz des internen Clock-Signals der Auswerteinheit abhängt. Die Drehzahl wird anhand einer Zeitmessung zwischen zwei Flanken bestimmt. Diese Zeitmessung erfolgt über das Zählen der Flanken eines konstanten Clock-Frequenzsignals im MHz-Bereich. Ist die Clock-Frequenz geringer, so sind zwischen zwei Flanken dementsprechend weniger Pulse des Clock-Signals vorhanden. Eine Verringerung der Wertauflösung ist die Folge. Da es sich bei dem Schlupf in der Praxis nur um sehr kleine Unterschiede zwischen den Beträgen der Umfangsgeschwindigkeit des Rades und der Rolle handelt, muss eine ausreichend hohe Clock-Frequenz vorhanden sein, um den Schlupf auflösen zu können. Bei diesem Simulationsszenario wird ein konstanter Schlupf von 0.5% der Geschwindigkeit vom Physik-Störmodell des Sensormodells erzeugt.

Es gelten für die globalen Simulationsparameter folgende Werte:

Parameter	Wert
Fahrtgeschwindigkeit v	400km/h
Schrittweitensteuerung	Fixed Step (0.001s)
Simulationszeit	10s

Tabelle 9 globale Simulationsparameter

4.3 Sensorsimulationen

Bei diesem Kapitel wird das Simulationsszenario, beschrieben in Kapitel 4.2.1, angewandt. Anhand der Sensorsignale während der Simulation der lateralen Sprungantwort werden im Folgenden die Funktionen der Sensormodelle vom Encoder, LVDT, und Kraftsensor veranschaulicht. Auf die Darstellung der Funktionen vom Laser-Sensormodell und Moment-Sensormodell wurde in diesem Kapitel verzichtet, da dessen modellierte Phänomene sehr ähnlich implementiert worden sind, wie bei den Modellen für den LVDT-Sensor und den Kraftsensor.

4.3.1 Winkel/Drehzahlmessung mit Encoder-Modell

Die Funktionen des Encodermodells sind in Kapitel 3.6 beschrieben. Bei den folgenden Simulationen werden die Signale des Encoders am linken Rad untersucht. Dabei werden die einzelnen physikalisch und technisch gestörten und fehlerbehafteten Sensorsignale separat mit den idealen Signalen verglichen. Die implementierten Phänomene des Sensormodells werden in diesem Abschnitt nach der Struktur aus Kapitel 3.6 gegliedert.

Sensor-Physikmodell:

Das Sensor-Physikmodell beschreibt das ideale physikalische Verhalten des Sensors. Die gemessene Raddrehzahl wird in eine Winkelgeschwindigkeit der Schlitzscheibe im Encoder umgerechnet.

Physik-Störmodell:

Das Physik-Störmodell addiert Störungen auf das ideale Signal auf. Bei dem Encodermodell sind es Störungen, verursacht durch Schlupf, Unwucht und Geschwindigkeitsrauschen. Da der Schlupf in Kapitel 4.4 separat an einem anderen Simulationsszenario behandelt wird, ist der in dieser Simulation nicht vorhanden.

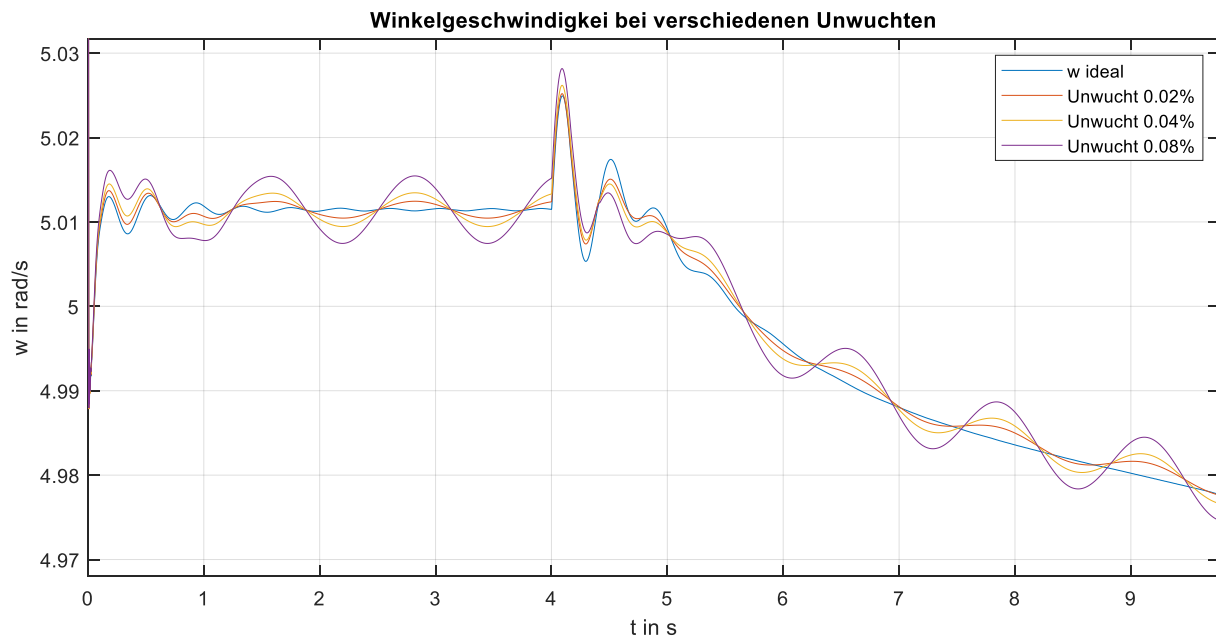


Abbildung 113 Winkelgeschwindigkeit w bei verschiedenen Unwuchten (Encoder linkes Rad)

Die Unwucht erzeugt eine sinusförmige Abweichung vom idealen Messwert, abhängig von der Höhe der Abweichung der Drehachse von Rad und Mittelpunkt der Schlitzscheibe, welche in % des Radius der Schlitzscheibe angegeben ist. Die Frequenz dieses überlagerten Sinussignals ist proportional zu der der Winkelgeschwindigkeit des Rads.

Zusätzlich zu der Unwucht wurde ein Rauschen implementiert:

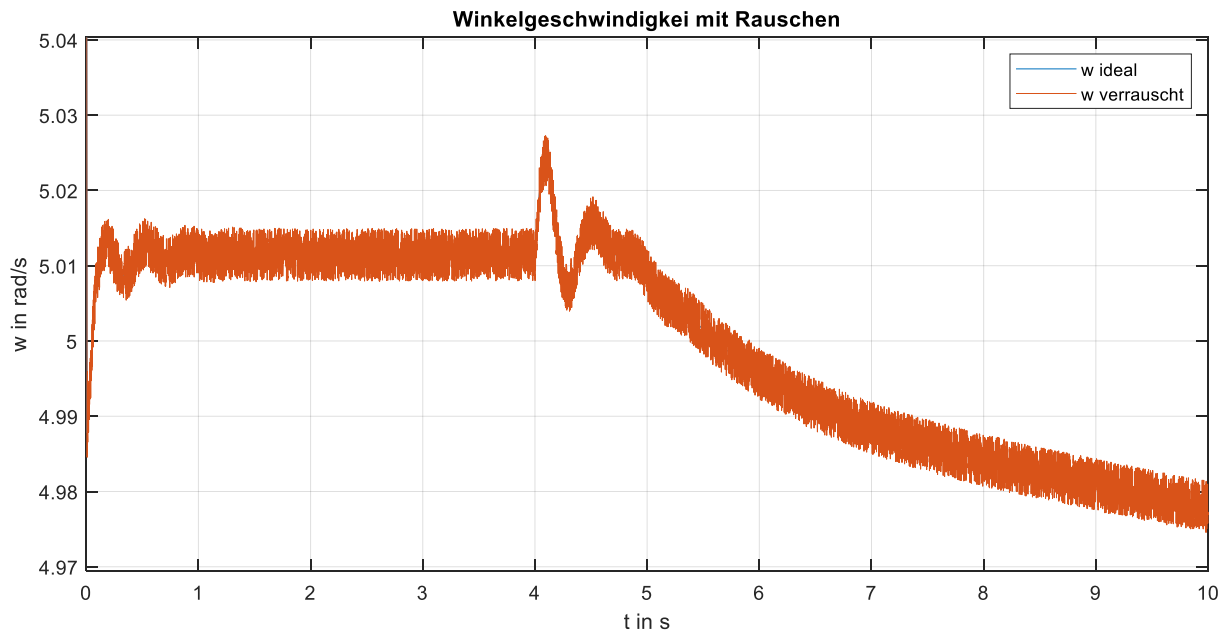


Abbildung 114 Winkelgeschwindigkeit w mit Rauschen (Encoder linkes Rad)

Beim verrauschten Signal handelt es sich um ein überlagertes weißes Rauschen auf dem idealen Signal mit einer Rauschamplitude von 0.001rad/s und einem weißen Rauschanteil, welcher von der Drehzahl abhängig ist. In diesem Fall ($\omega=5\text{rad/s}$) beträgt dessen Amplitude ca. 0.0025rad/s .

Sensor-Technikmodell:

Das Sensor-Technikmodell ist eine Umrechnung von der Winkelgeschwindigkeit ω in ein Frequenzsignal f .

Technik-Störmodell:

Im Technik-Störmodell wurde eine Zeit- und Wertdiskretisierung implementiert.

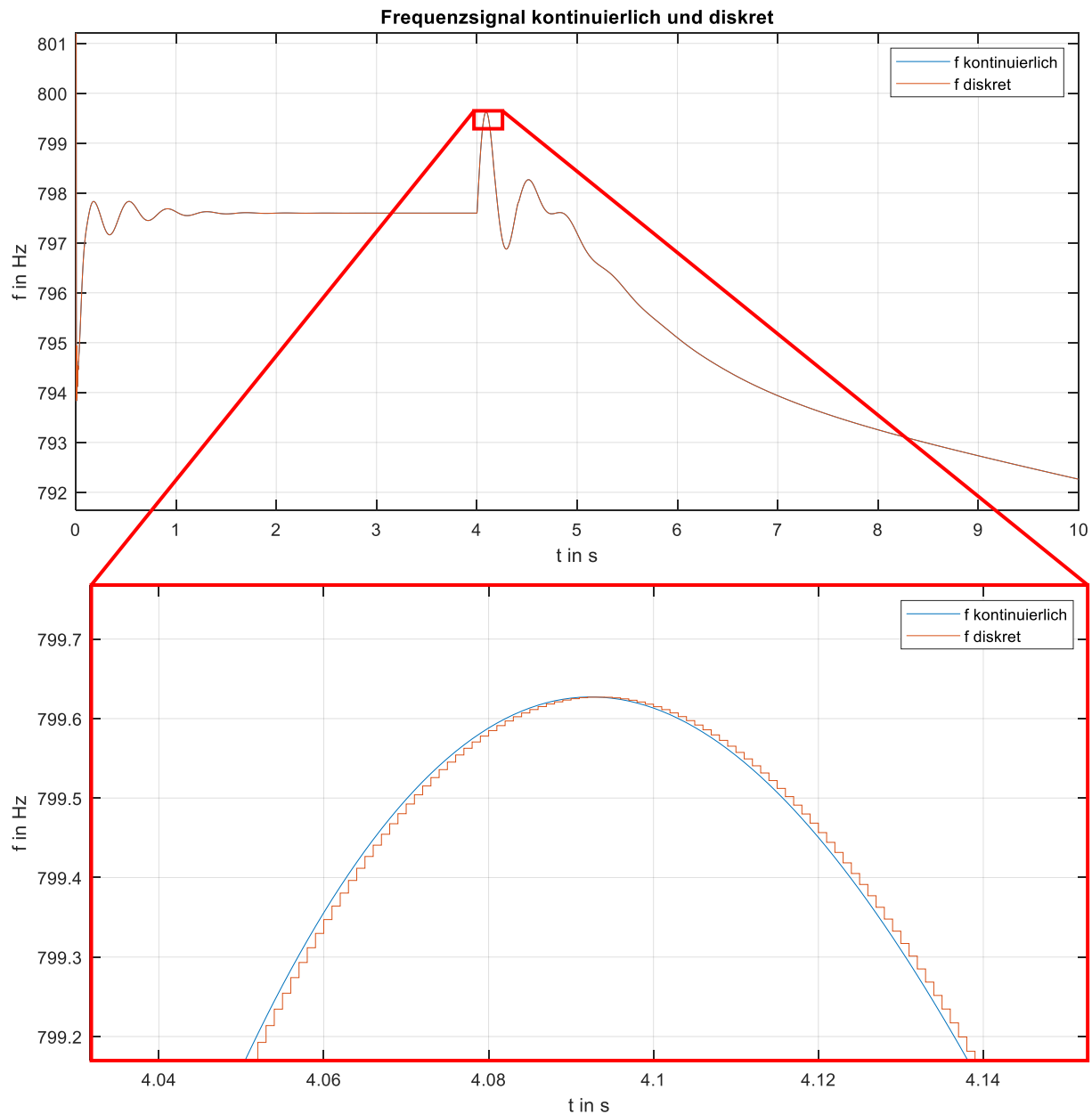
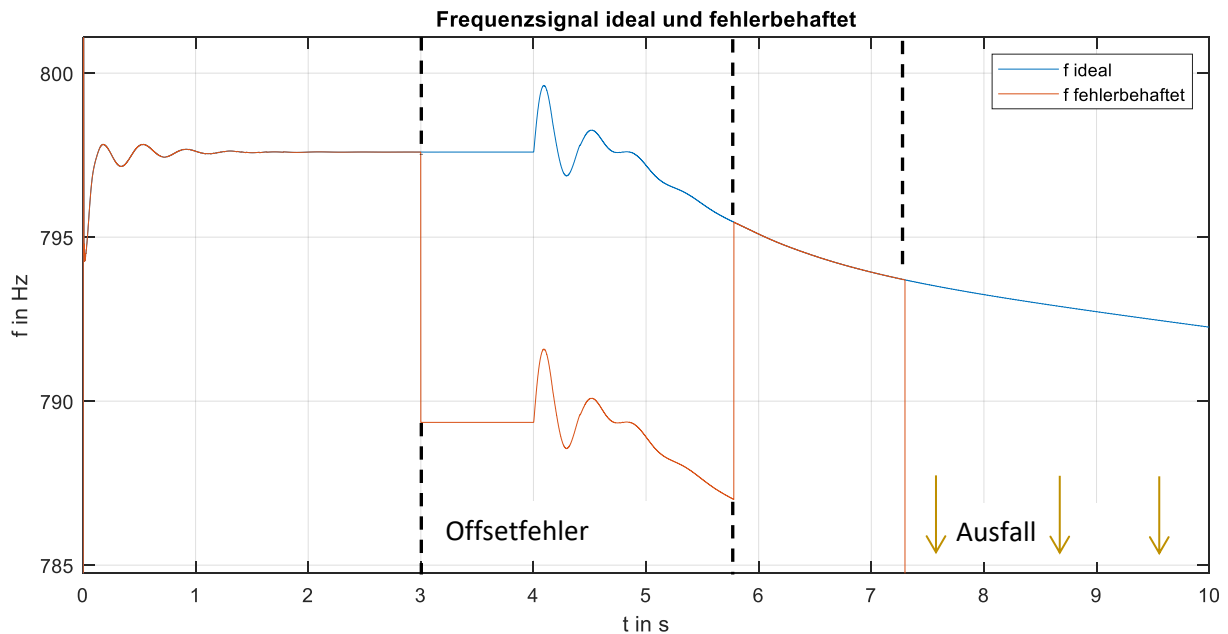


Abbildung 115 Frequenzsignal f kontinuierlich und diskret (Encoder linkes Rad)

Wie in Abbildung 115 zu sehen ist, wurde das zunächst kontinuierliche Signal in der Zeit und im Wert diskretisiert. Die Winkelgeschwindigkeitsabweichung, die durch diese Störung verursacht wird, ist sehr gering und würde im Messrauschen untergehen.

Technik-Fehlermodell

Die in Kapitel 3.6.6 beschriebenen technischen Fehlerszenarien sind im folgenden Plot zusammengefasst:

Abbildung 116 Frequenzsignal f ideal und fehlerbehaftet (Encoder linkes Rad)

Zeit t	Fehlerfall
3s bis 5.8s	Offsetfehler (zum B. durch Fehler von Zähnen an der Schlitzscheibe)
7.4s bis 10s	Ausfall (f fällt auf 0Hz)

Folgende Tabelle beschreibt die Fehlerszenarien, welche in Abbildung 116 zu sehen sind:

Tabelle 10 Physik-Fehlerszenarien beim Encoder

4.3.2 Distanzmessung mit LVDT-Sensormodell

Die Funktionen des LVDT-Sensormodells sind in Kapitel 3.7 beschrieben. Bei den folgenden Simulationen werden die Signale des linken LVDT-Sensors (dx_{links}), welche für die Berechnung des Gier-Winkels mit Formel 33 verwendet wird untersucht. (Die Sensorposition ist Abbildung 39 (X1) zu entnehmen) Dabei werden die einzelnen physikalisch und technisch gestörten und fehlerbehafteten Sensorsignale separat mit den idealen Signalen verglichen. Die implementierten Phänomene des Sensormodells sind nach der Struktur aus Kapitel 3.7 gegliedert.

Sensor-Physikmodell:

Das Sensor-Physikmodell beschreibt die ideale Übersetzung von der Messdistanz dx_{links} in die Eisenkernposition x .

Physik-Störmodell:

Das Physik-Störmodell erzeugt Störungen auf das ideale Signal. Bei dem LVDT-Sensormodell sind es Totzeit, Spiel und Rauschen. Diese werden im Folgenden nacheinander separat anhand der Eisenkernpositionssignale x des LVDT-Sensormodells für dx_{links} simuliert umso die Auswirkungen der Störphänomene zu visualisieren.

Folgender Plot zeigt den Verlauf der Eisenkernposition x bei 3 verschiedenen Totzeiten auf.

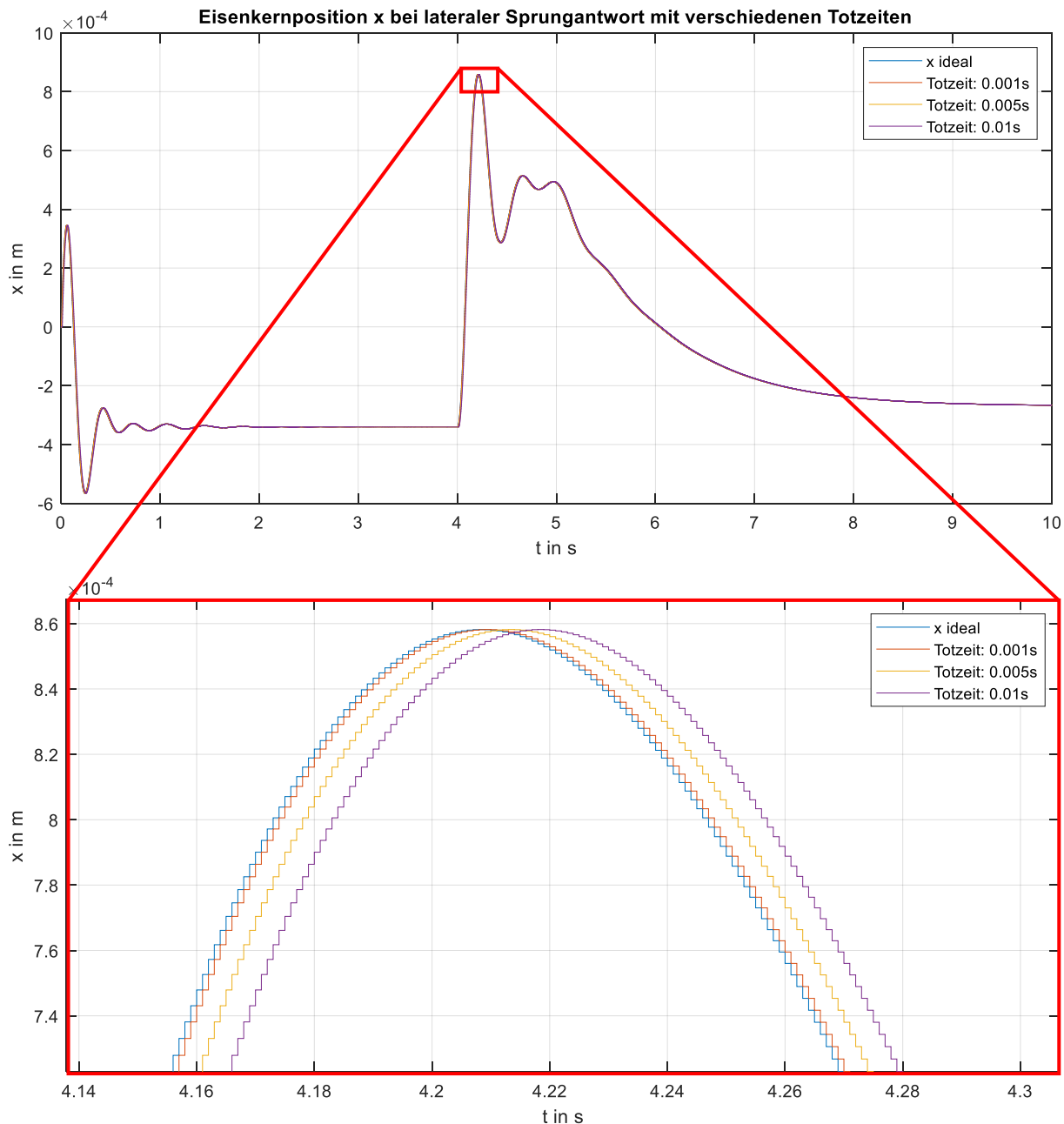


Abbildung 117 Eisenkernposition x bei verschiedenen Totzeiten (LVDT-Sensor für dx_{links})

Die Signale aus Abbildung 117 sind zeitdiskret dargestellt. Dies ist der Zeitschrittweite von 0.001s während der Simulation geschuldet. Die Totzeiten von 1 bis 10 Zeitschritten sind deutlich zu erkennen. Eine Totzeit verändert die Dynamik des Gesamtsystems. Die Regelgüte des Lateralreglers ist somit abhängig von der Höhe der Totzeit in den Sensoren.

Als Nächstes wird das mechanische Spiel betrachtet. Die Eisenkern-Position x wurde bei drei verschiedenen Spielen simuliert.

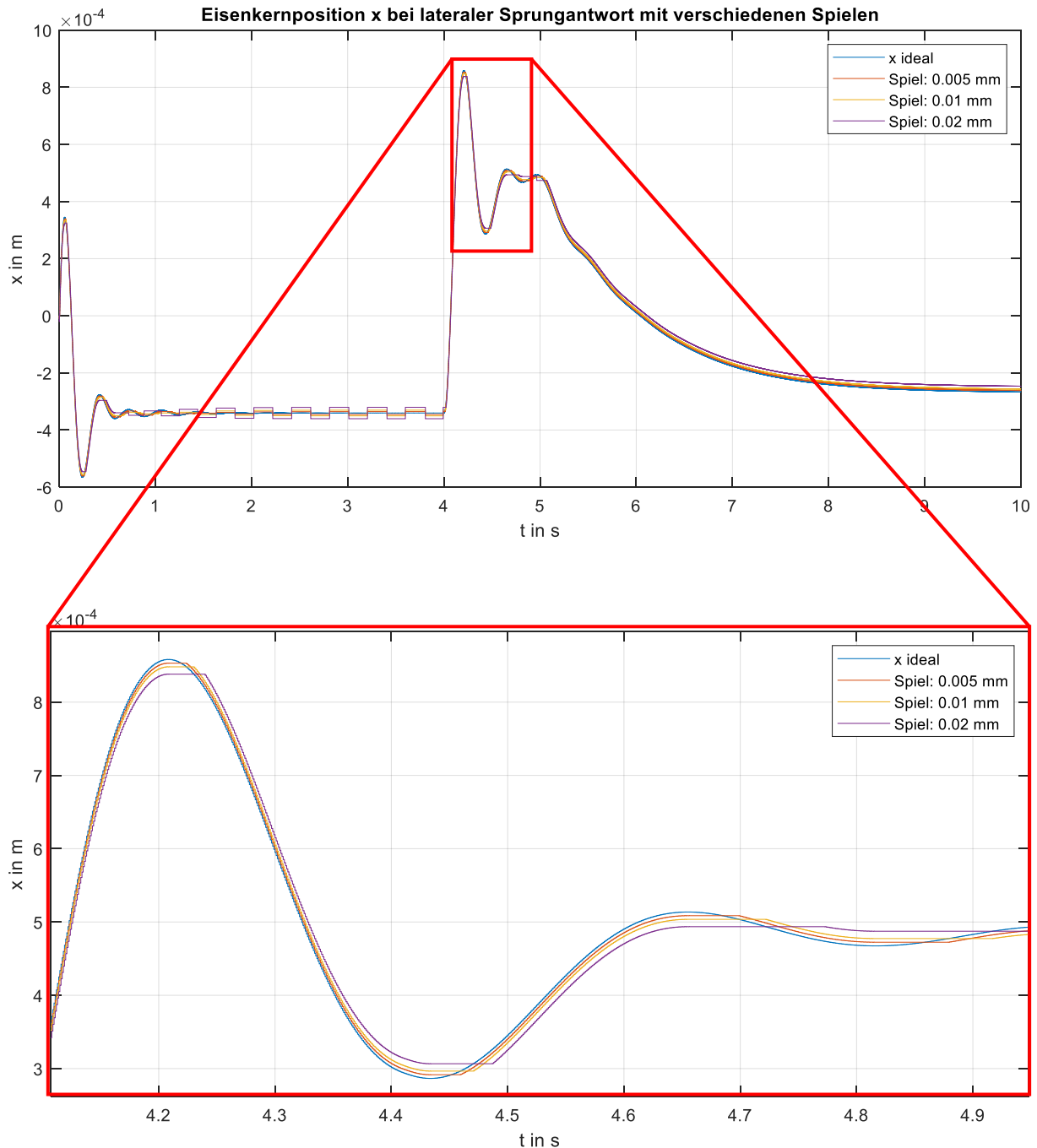


Abbildung 118 Eisenkernposition x bei verschiedenen Spielen (LVDT-Sensor für dx_{links})

Das Spiel erzeugt eine Verzögerung im Signalverlauf und ein Abschneiden des Signals bei den Extrempunkten, wie der Abbildung 118 zu entnehmen ist. Da das Spiel ähnlich wie die Totzeit einen zeitlichen Versatz verursacht, wirkt diese Störung dynamikverändernd auf das Gesamtsystem.

Ein weißes Rauschen bildet die letzte physikalische Störung des LVDT-Sensormodells:

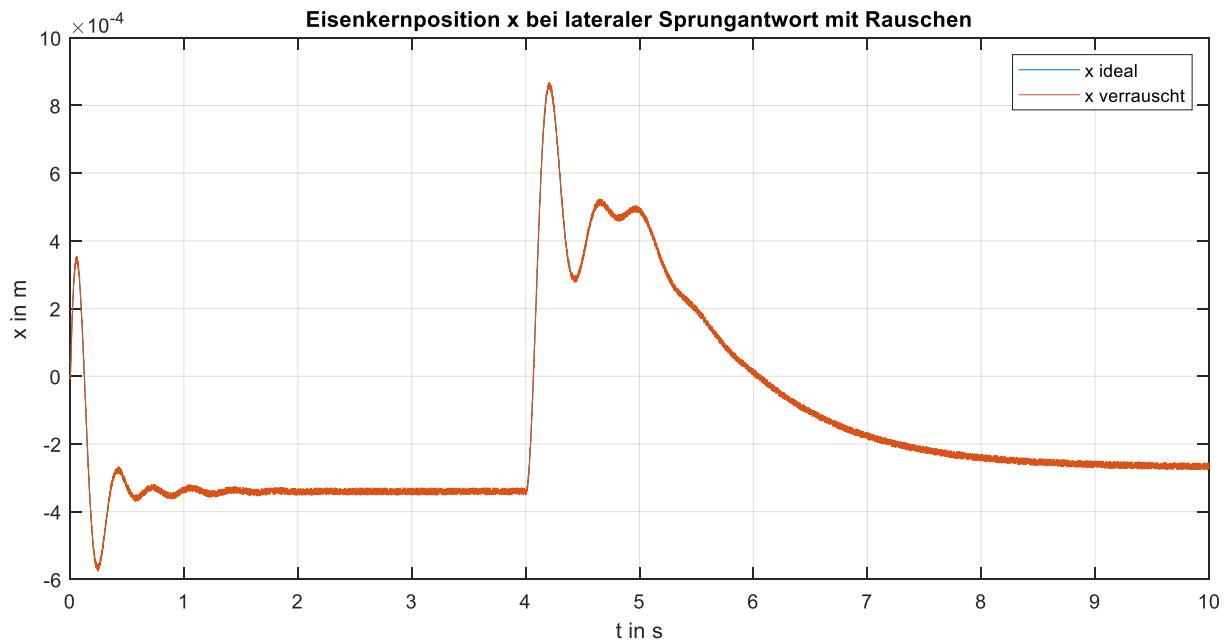


Abbildung 119 Eisenkernposition x mit Rauschen (LVDT-Sensor für dx_links)

Hierbei wurde ein konstantes weißes Rauschen mit einer Amplitude von 0.01mm erzeugt.

Physik-Fehlermodell:

Die in Kapitel 3.7.3 beschriebenen physikalischen Fehlerszenarien sind im folgenden Plot zusammengefasst:

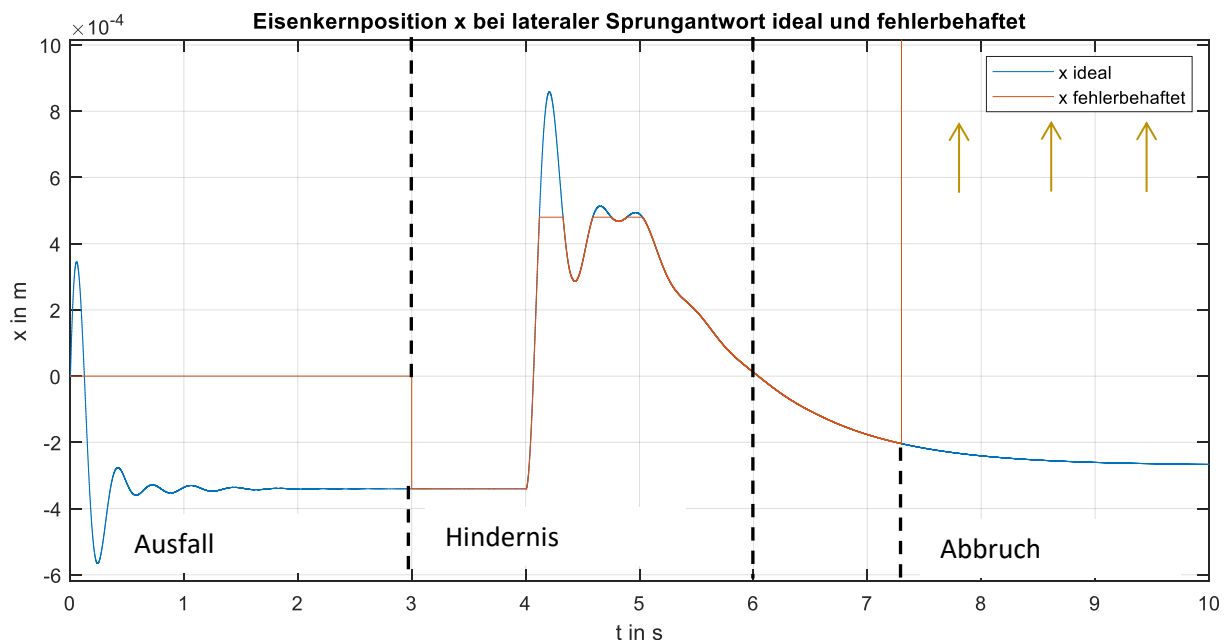


Abbildung 120 Eisenkernposition x ideal und fehlerbehaftet (LVDT-Sensor für dx_links)

Folgende Tabelle beschreibt die Fehlerszenarien aus Abbildung 120:

Zeit t	Fehlerfall
0-3 s	Ausfall des Sensors
3-6 s	Signal auf 0.48mm limitiert. Deutet auf ein Hindernis im Innenrohr hin.
7.3-10 s	Kontinuierlicher maximaler Wert von 60mm wird ausgegeben. Abbruch der Stange im Innenrohr

Tabelle 11 Physik-Fehlerszenarien beim LVDT-Sensor

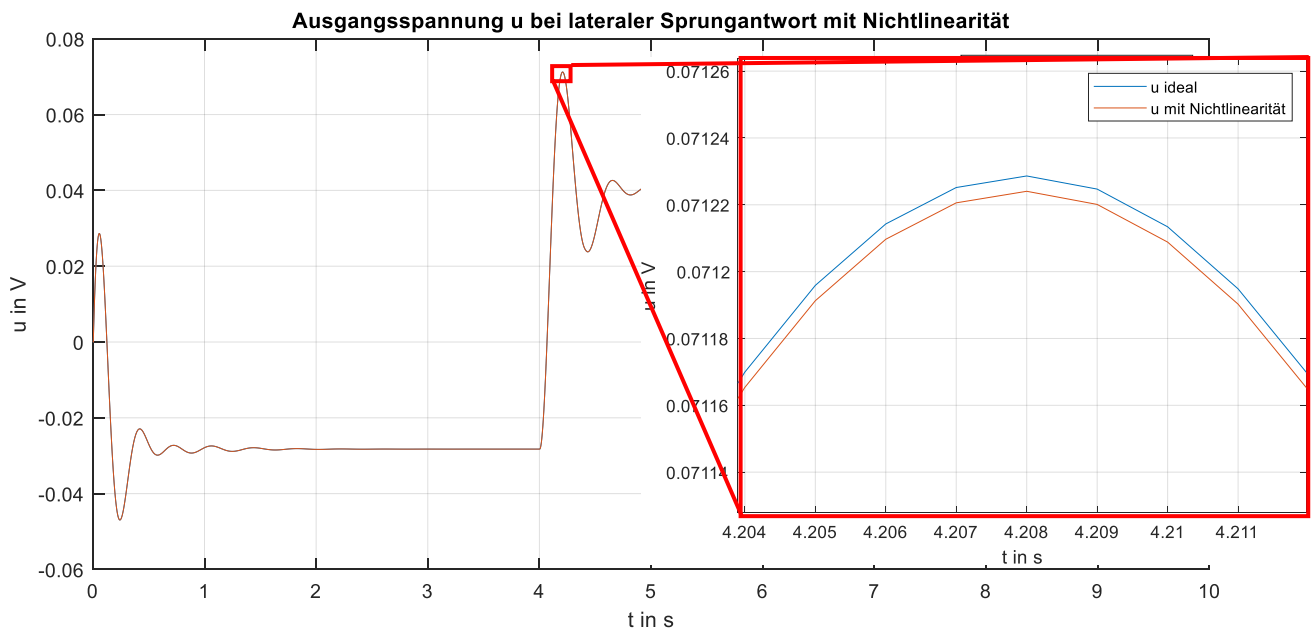
Sensor-Technikmodell

Das Technikmodell beschreibt die Umrechnung von der Eisenkernposition x in eine Spannung u . Die genauen elektrischen Vorgänge, wie sie in Kapitel 3.7.5 bis 3.7.12 beschrieben sind, werden nicht in einzelne Plots dargestellt. Es wird sich im Folgenden auf die Stör- und Fehlerphänomene auf die Ausgangsspannung u fokussiert.

Technik-Störmodell

Das Technik-Störmodell spielt Störungen auf das ideale Spannungssignal auf. Bei dem LVDT-Sensormodell sind es Nichtlinearität, Temperaturabweichung und Rauschen, verursacht durch elektrische Bauteile. Diese Störungen werden in den folgenden Simulationen einzeln veranschaulicht.

Abbildung 121 stellt die Ausgangsspannung u des LVDT-Sensors mit und ohne Nichtlinearität dar:

Abbildung 121 Ausgangsspannung mit Nichtlinearität (LVDT-Sensor für dx_{links})

Die Nichtlinearität beträgt bei dem verwendeten LVDT-Sensor laut Datenblatt 0.25% vom Nennwert. Die Abweichung durch die Nichtlinearität beträgt in dieser Simulation 0.08mV. Dies ist eine zu vernachlässigen geringe Abweichung.

Die Störung durch die Restwelligkeit, beschrieben in Kapitel 3.7.8 ist in der folgenden Abbildung ersichtlich:

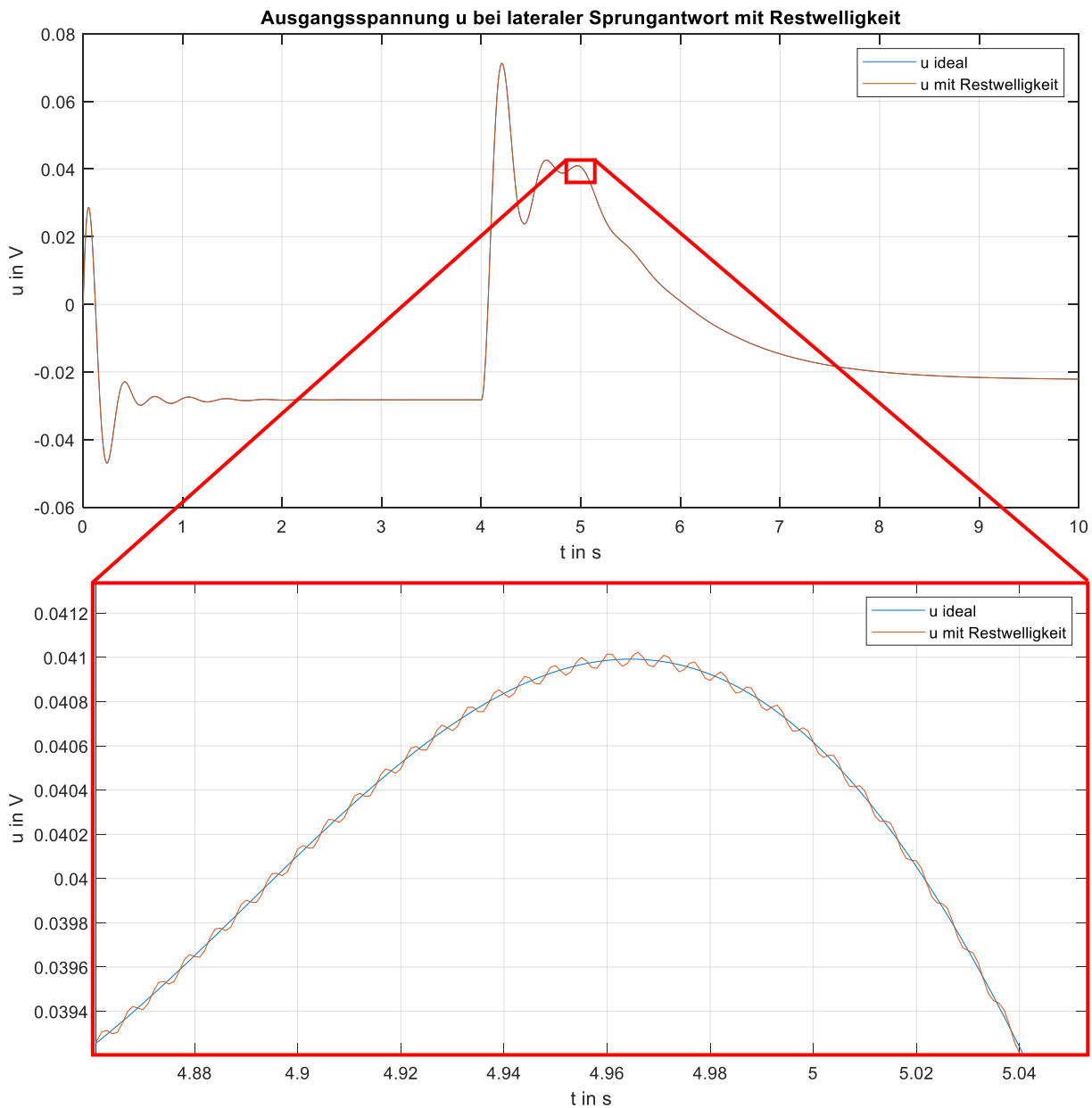


Abbildung 122 Ausgangsspannung mit Restwelligkeit (LVDT-Sensor für dx_{links})

Die Amplitude der sinusförmigen Störabweichung durch die Restwelligkeit beträgt ca. 0.005mV und geht somit im Rauschen unter.

Für die Temperaturabhängigkeit des Sensor-Ausgangssignals wurde die Simulation bei vier verschiedenen Temperaturen wiederholt und in Abbildung 123 dargestellt:

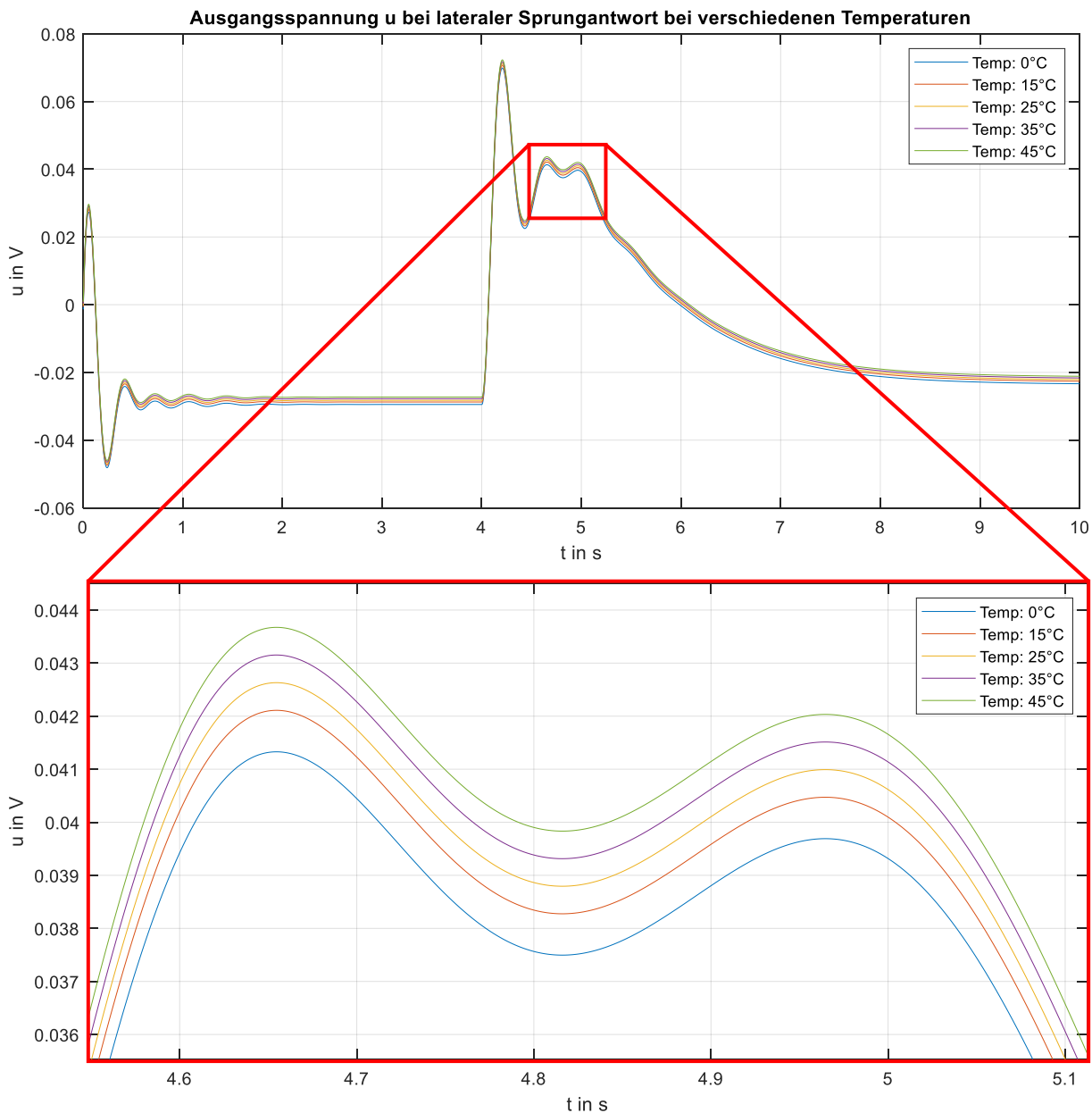


Abbildung 123 Ausgangsspannung bei verschiedenen Temperaturen (LVDT-Sensor für dx_links)

An den Graphen ist ein temperaturabhängiger Offset im Signal erkennbar. Je höher die Temperatur, umso höher sind die Werte für die Ausgangsspannung u . Pro 10°C Temperaturänderung, steigt die Ausgangsspannung vom LVDT-Sensor um ca. 0.005V an.

Im letzten Abschnitt im Technikmodell des LVDT-Sensormodells wird das analoge Spannungssignal vorgefiltert und anschließend quantisiert (siehe Kapitel 3.7.11).

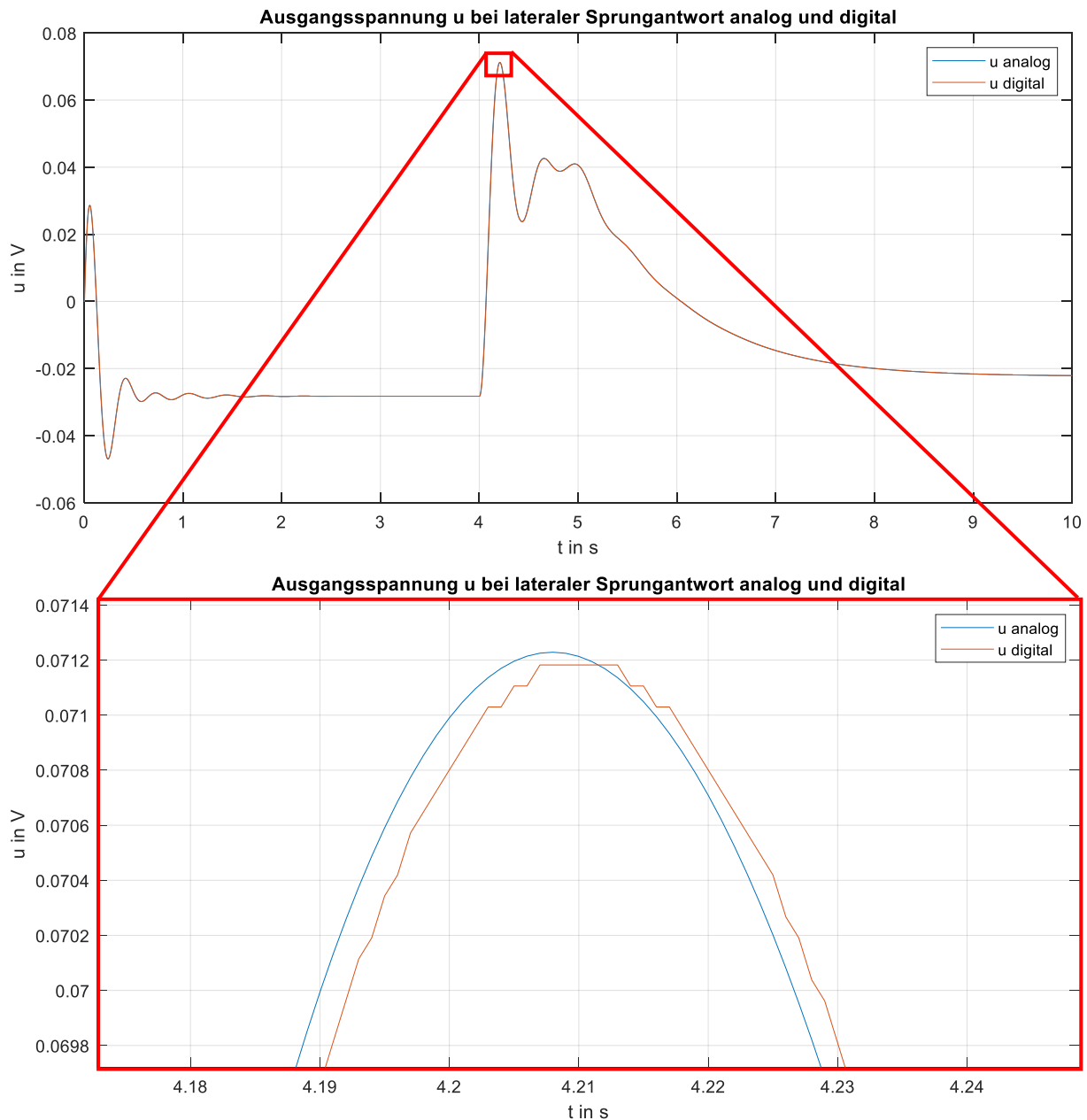


Abbildung 124 Ausgangsspannung analog und digital (LVDT-Sensor für dx_{links})

In Abbildung 124 ist die Quantisierung des A/D-Wandlers und die Phasenverschiebung, erzeugt durch die Vorfilterung zu erkennen. Sowohl die Diskretisierung als auch die Phasenverschiebung sind in ihrer Störintensität nicht signifikant. Dies liegt an der hohen Auflösung der Auswerteinheit QuantumX mit einer Wortbreite von 16Bit. Der Bessel-Filter verursacht mit seinen 100Hz Eckfrequenz eine zu vernachlässigende Phasenverschiebung.

4.3.3 Kraftmessung mit Kraft-Sensormodell

Im Rahmen dieser Arbeit wurden auch Kraftsensoren und Momentsensoren modelliert. Diese werden im Prüfstand hauptsächlich zu Beobachtungszwecken (Referenzsensorik) eingesetzt. Der Lateralregler besitzt kein Eingangssignal für Kraft- oder Momentsensoren. Doch kann die laterale Sprungantwort genutzt werden, um bestimmte Kraftänderungen im mechanischen System zu untersuchen. Die Kräfte am Lenker und an den Sekundärfedern sind dafür geeignet. Am Lenker entsteht ein Kraftsprung bei $t=4s$, wie in Abbildung 125 zu erkennen ist. Für die Untersuchung des Übersprechens der Kräfte aus verschiedenen Rauschachsen wird die Kraftmessung an einer

Sekundärfeder genutzt. Bei den verwendeten Sensoren handelt es sich um die Kraft- und Momentenaufnehmer *HBM MCS10 50kN* mit je 6 Kanälen:

- 3 für die Kräfte in x, y, z-Richtung
- 3 Für Momente um die x, y, z-Achsen

Die Funktionen des Kraftsensormodells sind in Kapitel 3.9 beschrieben. Im Folgenden werden die einzelnen physikalisch und technisch gestörten und fehlerbehafteten Sensorsignale mit den idealen Signalen verglichen. Dabei werden die implementierten Phänomene des Sensormodells nach der Struktur aus Kapitel 3.9 gegliedert.

Sensor-Physikmodell:

Das Sensor-Physikmodell beschreibt die ideale Umrechnung von der Kraft F in die Dehnung E des Federkörpers im Inneren des Sensors.

Physik-Störmodell:

Das Physik-Störmodell addiert Störungen auf das ideale Signal von E auf. Bei dem Kraft-Sensormodell sind es Störabweichungen durch Nichtlinearität, Hysterese, Kriechen und Rauschen. Stör- und fehlerbehaftete Sensorsignale des Kraftsensormodells am Lenker werden mit idealen Signalen verglichen, umso die Auswirkungen der einzelnen Störphänomene zu visualisieren. Anschließend wird das Übersprechen der Kraftkomponenten aus zwei verschiedenen Raumachsen für das verwendete Sensormodell untersucht. Dabei werden die Sensorsignale des virtuellen Kraftsensors an einer der Sekundärfedern verwendet.

Die physikalischen Störeinflüsse, wie Nichtlinearität, Kriechen und die Hysterese, die auf die Dehnung E des Federkörpers im Kraftsensor am Lenker wirken, werden in Abbildung 125 dargestellt:

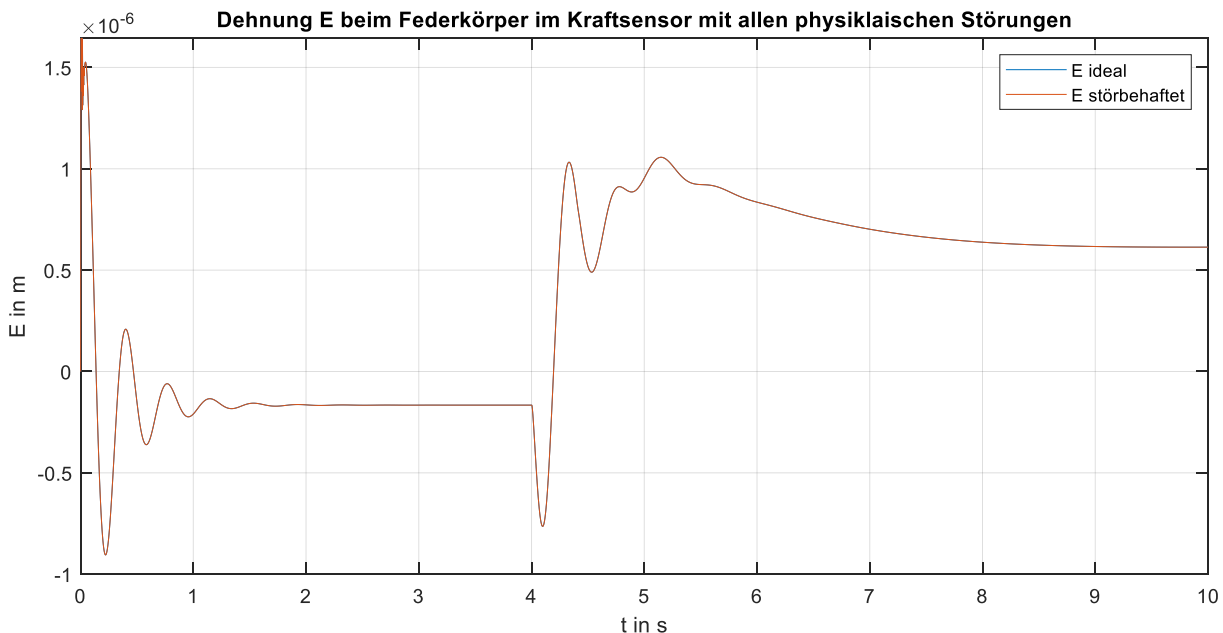


Abbildung 125 Dehnung mit und ohne physikalische Störungen beim Kraftsensor am Lenker

Auf Abbildung 125 sind die Abweichungen durch die Störungen nicht zu erkennen. Aus diesem Grund wurden im nächsten Polt nur die Abweichungen der Dehnung ΔE , verursacht durch die einzelnen Störungen veranschaulicht:

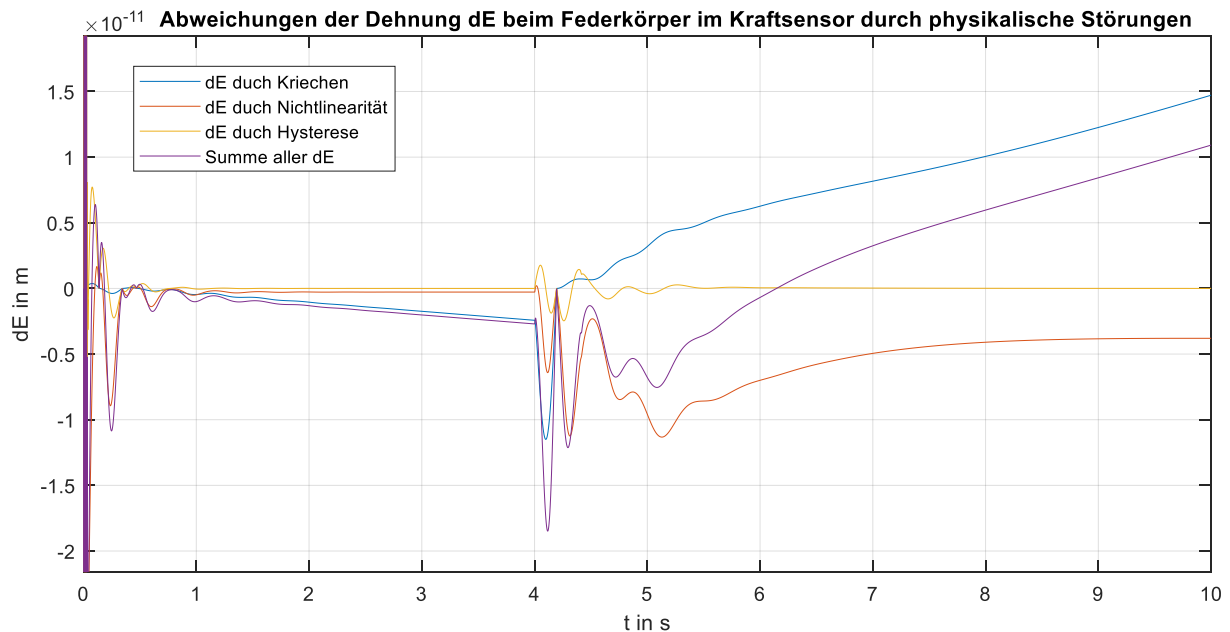


Abbildung 126 Dehnungsabweichung durch die physikalischen Störungen beim Kraftsensor am Lenker

Während der 10s langen Simulation kann ein Signaldrift, verursacht durch das Kriechen, beobachtet werden. Dieser ist jedoch nicht groß genug, dass dies im Messwert einen signifikanten Effekt auf die Kraftmessung bewirken würde. Auch die Abweichungen durch die Nichtlinearität und die Hysterese befinden sich in einem zu vernachlässigen Band. Ein Grund hierfür ist die, im Vergleich zur Nennkraft von 50000N geringe Kraft von wenigen 100N am Lenker, welche hier gemessen wird. Bei den verwendeten Messdosen handelt es sich außerdem um sehr präzise und hochwertige Messgeräte, die darauf ausgelegt sind, sehr kleine Hysterese- und Kriechabweichungen aufzuweisen.

Test des Übersprechens von Kräften und Momenten in verschiedenen Achsen (Querkrafteinfluss):

Im nächsten Simulationsexperiment wird das Übersprechen der Kräfte und der Momente von einer Raumachse zur anderen untersucht. Beschrieben ist diese Störung in Kapitel 3.9.2. Bei diesem Phänomen wirken sich beispielsweise Kräfte in x-Richtung auch auf Kräfte in z-Richtung aus und umgekehrt. In den Datenblättern der verwendeten Sensoren sind alle Abhängigkeiten in % der Nennkraft bzw. des Nennmoments von und auf alle Achsen angegeben.

Um das Übersprechen der Kräfte zu visualisieren, wurden die Kräfte in x- und z-Richtung des Sensors an einer Sekundärfeder während des Simulationsszenarios mit der Co-Simulation geplottet. Das Übersprechen von der Kraft in x-Richtung und der Momente sind ebenfalls simuliert. Es wird jedoch auf die Darstellung dieser in eigenen Plots verzichtet. Bei dieser Simulation wurde kein lateraler Sprung erzeugt, um eine Darstellung eines konstanten Kraftverlaufs zu ermöglichen.

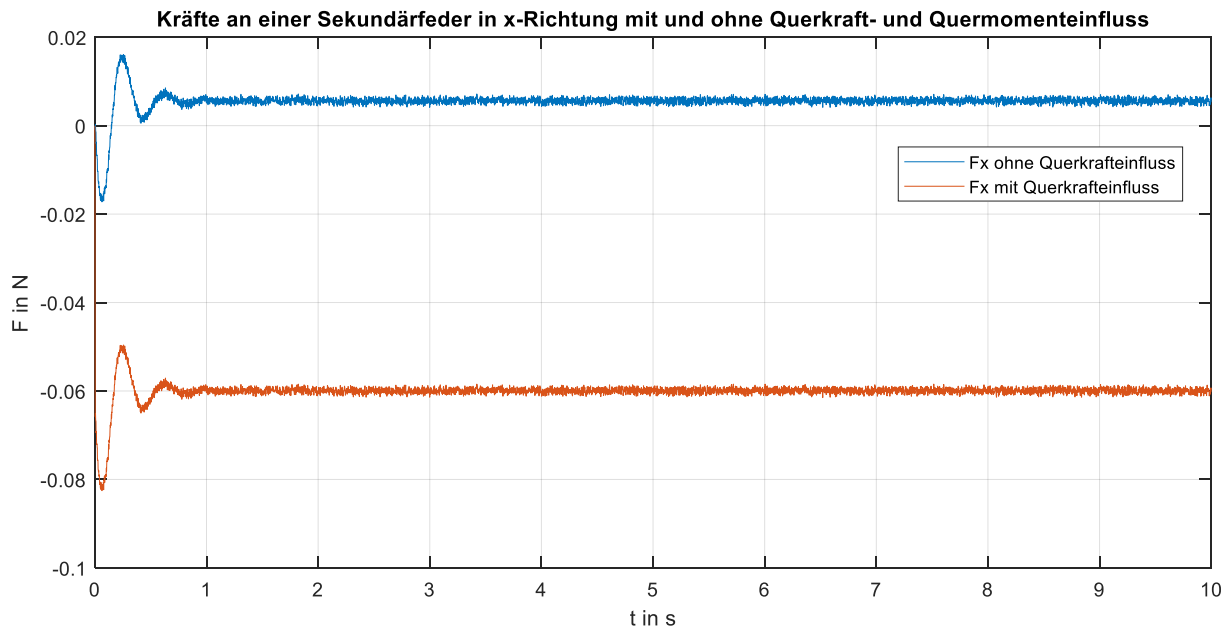


Abbildung 127 Kraft in x-Richtung (Sekundärfeder rechts hinten)

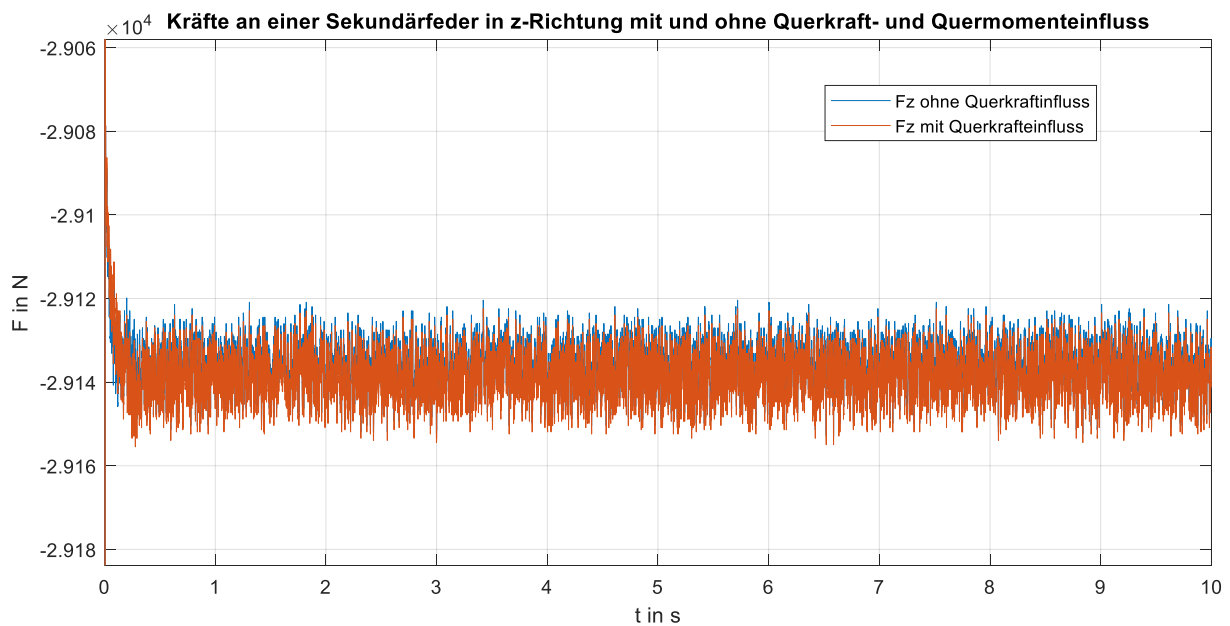


Abbildung 128 Kraft in z-Richtung (Sekundärfeder rechts hinten)

Während dieser Simulation stellt sich eine konstante Kraft von ca. 0.01 N in x-Richtung und ca. -29 kN in z-Richtung ein und diese bleiben bis zum Ende der Simulation bestehen. Da auf der Sekundärfeder senkrecht die Gewichtskraft des (virtuellen) Wagenkastens wirkt, ist die dominante Kraftkomponente die in z-Richtung. Die Kräfte in x- und y-Richtung fallen deutlich geringer aus.

Auf Abbildung 127 ist gut zu erkennen, wie sich die Kraft mit Einfluss der Querkräfte deutlich im Wert von der ohne Querkrafteinfluss unterscheidet. Die Abweichung der Kraftkomponente in x-Richtung beträgt dabei etwa 60 mN. Auf Abbildung 128 ist der Unterschied der Kräfte in z-Richtung, welcher weniger als 1 mN beträgt, kaum zu erkennen. Dies liegt daran, dass die Kraft in x-Richtung im Verhältnis viel geringer ist und somit auch ein geringeres Übersprechen auf die Kraft in z-Richtung aufweist. Die Kraftkomponente in z-Richtung hat wiederum, wegen ihres hohen Betrags, viel Einfluss auf die Kraft in x-Richtung.

Sensor-Technikmodell:

Das Technikmodell beschreibt die Umrechnung von der Dehnung E in eine Spannung u mittels Dehnungsmessstreifen.

Technik-Störmodell:

Das Technik-Störmodell spielt Störungen an das ideale Spannungssignal auf. Bei dem Kraft-Sensormodell sind es Temperaturabweichung und Rauschen, verursacht durch elektrische Bauteile. Außerdem wird die analoge Ausgangsspannung mittels eines A/D-Wandlers gefiltert und in ein digitales Signal konvertiert. Diese Störphänomene wurden analog zu dem Technik-Störmodell des LDVT-Sensors modelliert. Da diese bereits im Kapitel 4.3.2 visualisiert worden sind, wird hier auf eine Darstellung von der Temperaturabweichung, dem Rauschen und dem Einfluss der Digitalisierung am Ausgangssignal des Kraftsensors verzichtet.

Technik-Fehlermodell:

Die in Kapitel 3.9.6 beschriebenen technischen Fehlerszenarien sind im folgenden Plot zusammengefasst. Dazu wird das Szenario mit lateraler Sprungantwort verwendet und die Kraft am Lenker untersucht:

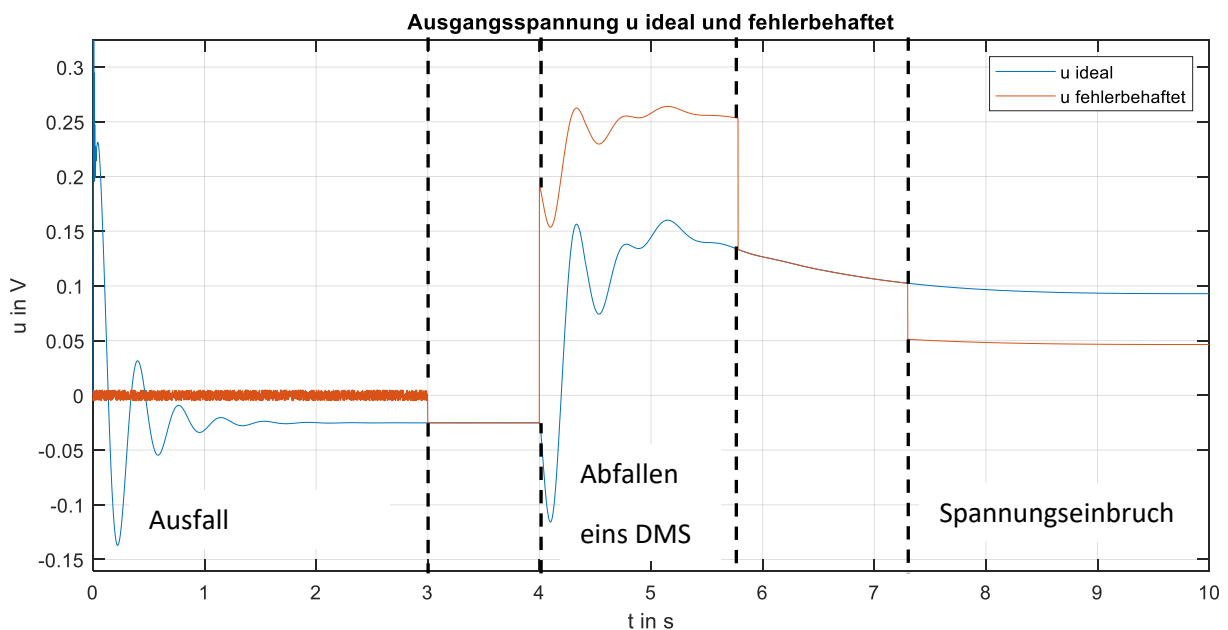


Abbildung 129 Ausgangsspannung ideal und fehlerbehaftet (Kraft am Lenker)

Zeit t	Fehlerfall
0-3 s	Ausfall des Sensors (+Rauschen)
4-5.8 s	Offset + Veränderte Steigung durch Abfallen eines von 4 DMS (prinzipiell)
7.3-10 s	Einbruch der Versorgungsspannung auf 50%

Folgende Tabelle beschreibt die in Abbildung 129 dargestellten Fehlerszenarien:

Tabelle 12 Physik-Fehlerszenarien beim Kraftsensor

4.4 Untersuchung der Auflösung des Encoders bei verschiedenen Clock-Frequenzen

Für dieses Simulationsexperiment wird das Szenario, beschrieben in Kapitel 4.2.2 angewandt. Der folgende Plot stellt die Beträge der Umfangsgeschwindigkeiten von Rad und Rolle dar. Dabei wurden

verschiedene Clock-Frequenzen verwendet, die auch im verwendeten Encoder *BaumerMHGP200* für die Rolle und HeidenhainAK2480 für die Räder genutzt werden können. Eine Radumfangsgeschwindigkeit von 400 km/h wurde eingestellt und der Schlupf beträgt in dieser Simulation konstante 0.5% der Geschwindigkeit, also 2km/h:

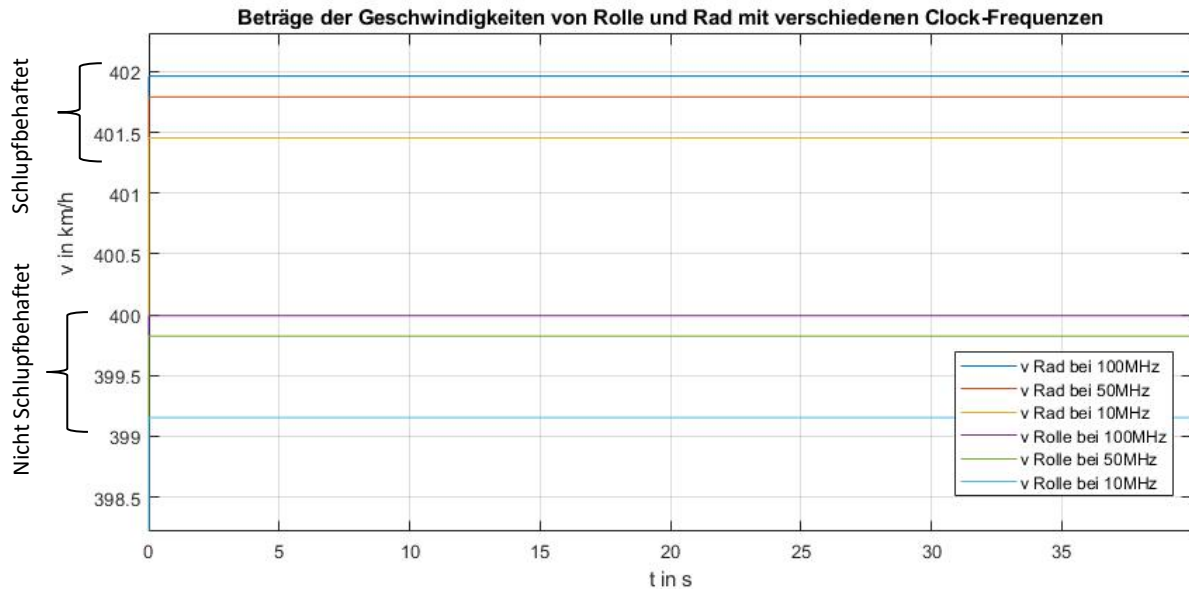


Abbildung 130 Geschwindigkeiten der Rolle und des linken Rades bei verschiedenen Clock-Frequenzen

Je niedriger die Clock-Frequenz ist, umso geringer ist auch die Auflösung. In der Implementierung wird das Sensorsignal immer auf den minimal auflösbaren Wert abgerundet, was die niedrigeren Werte für die Geschwindigkeit bei den niedrigeren Clock-Frequenzen in Abbildung 130 erklärt.

Tabelle 13 zeigt die Auflösungen der Geschwindigkeiten absolut und relativ zu 400km/h dar. Außerdem zeigt sie auch die relative Auflösung des Schlupfes von 2km/h auf.

Clock-Frequenz	Auflösung Δv	Relative Auflösung	Relative Auflösung vom Schlupf von 0.5%
10MHz	1.677km/h	0.419%	83.86%
50MHz	0.3366km/h	0.084%	16.83%
100MHz	0.1683km/h	0.042%	8.42%

Tabelle 13 Auflösungen des Encoders bei verschiedenen Clock-Frequenzen

Die maximal einstellbare Clock-Frequenz ist 10MHz. Dabei erreicht man eine Auflösung des Schlupfes bei Höchstgeschwindigkeit von knapp über 8%.

Im Folgenden wird für den Schlupf eine sinusförmige Kurve simuliert. Diese weist eine Amplitude von 1km/h und eine Basis von 402km/h auf. Abbildung 131 stellt diese sinusförmige Geschwindigkeit mit den Auflösungen aus Tabelle 13 dar:

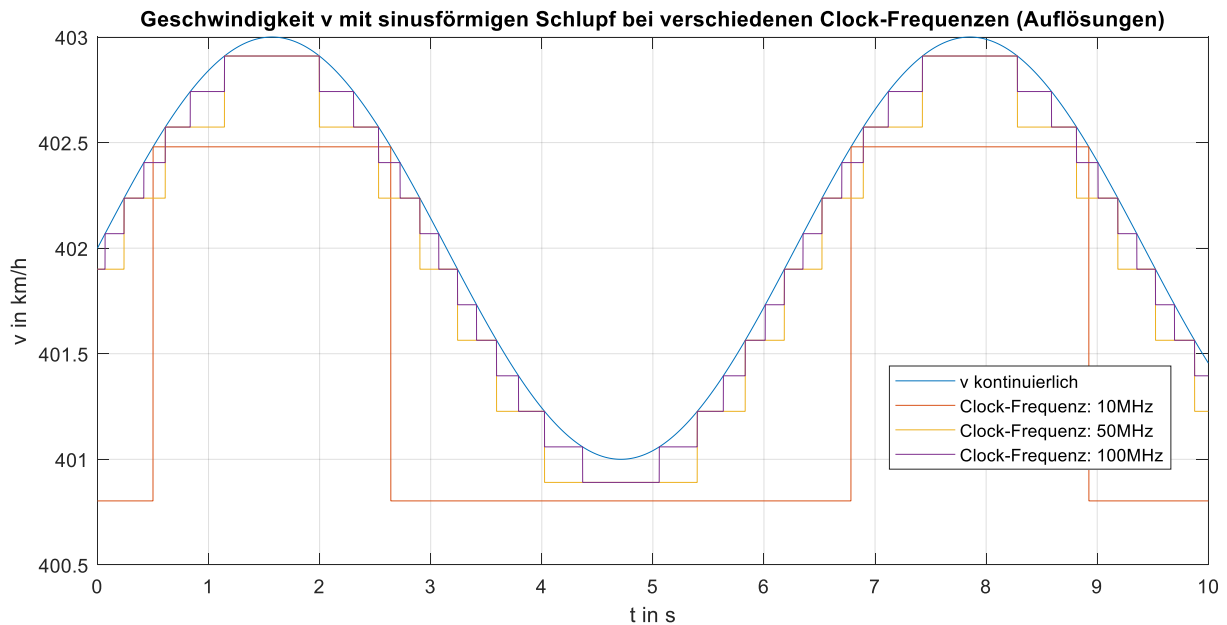


Abbildung 131 Signal der sinusförmig schlupfbehafteten Geschwindigkeit v aufgelöst mit verschiedenen Clock-Frequenzen

Mit einer Auflösung bei 10MHz Clock-Frequenz sind nur zwei Zustände der Kurve auflösbar, während bei 50MHz und 100MHz Clock-Frequenz eine deutlich bessere Auflösung der sinusförmigen Geschwindigkeit möglich ist.

4.5 Anwendung der Co-Simulationsumgebung mit Sensorsimulation

Bisher wurden lediglich die Störungen und Fehler der Signale der einzelnen Sensoren bei idealer lateraler Sprungantwort untersucht. Nun werden die realistischen Sensorsignale als Eingangssignale für die Lateralregelung genutzt. Somit wirken sich die implementierten Störungen und Fehler der Sensormodelle auch auf die Qualität der Lateralregelung aus. Als erstes wird die laterale Sprungantwort mit und ohne Sensorsimulation untersucht. In Kapitel 4.5.2 werden die Einflüsse der dynamikverändernden Störeffekte wie die Totzeit und das Spiel beim LVDT-Sensor veranschaulicht. Kapitel 4.5.3 visualisiert anschließend die Einflüsse einiger Fehlerszenarien auf die Lateralregelung.

4.5.1 Test der Lateralregelung bei idealen und realen Sensorsignalen

Die Simulationsergebnisse der lateralen Sprungantwort mit Sensorsimulation werden mit denen der Simulation ohne Sensorschnittstelle verglichen:

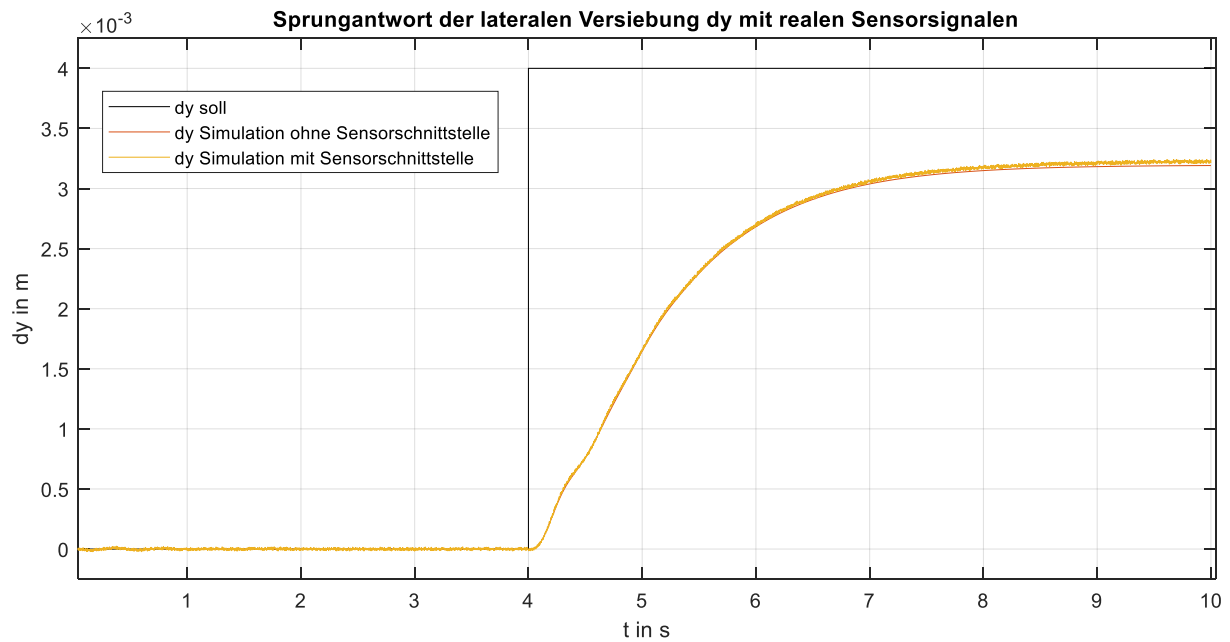


Abbildung 132 Simulation der laterale Sprungantwort mit und ohne Sensorsimulation

Der Lateralregler regelt die laterale Verschiebung dy auf einen stationären Endwert ein. Bei beiden Simulationen ist eine ähnliche Regelgüte gegeben. Da die Sensorsimulation leichte Veränderungen der Systemdynamik mit sich bringt, ist der stationäre Endwert des geschlossenen Regelkreises ein etwas anderer. Zu erkennen ist dies an dem etwas höheren Wert der lateralen Verschiebung dy bei der Simulation mit Sensorschnittstelle.

Folgender Graph bildet das, bei der Sprungantwort verwendete Stellmoment ab:

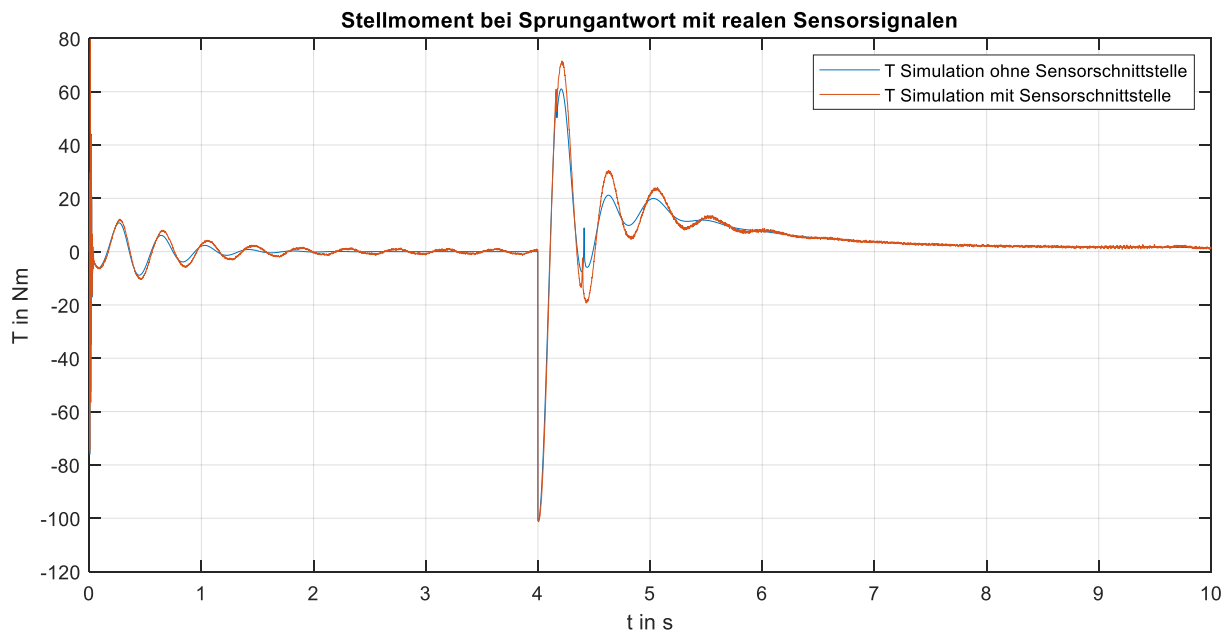


Abbildung 133 Stellmoment bei Simulation der laterale Sprungantwort mit und ohne Sensorsimulation

Die Stellgrößen der beiden Simulationen verhalten sich ebenfalls ähnlich. Dies bedeutet, dass auch mit Beachtung der Sensorik im Modell keine signifikant höhere Energie benötigt wird, um auf dieselbe Führungssprunghöhe zu reagieren.

4.5.2 Test der Lateralregelung bei dynamikverändernden Störungen im LVDT-Sensor

Die im LVDT-Sensor wirkenden Störungen, verursacht durch die Totzeit und des mechanischen Spiels wirken dynamikverändernd auf die gesamte Regelstrecke, da sie Verzögerungen im Signalfloss verursachen. Im Folgenden werden dessen Auswirkungen auf den Lateralregler veranschaulicht.

Totzeit im LVDT-Sensor:

Um den Einfluss der Totzeit der LVDT-Sensormodellen auf die laterale Sprungantwort visualisieren zu können, wurden Simulationen mit 3 verschiedenen Totzeiten durchgeführt. Als Simulationsszenario wird hier wieder die laterale Sprungantwort verwendet.

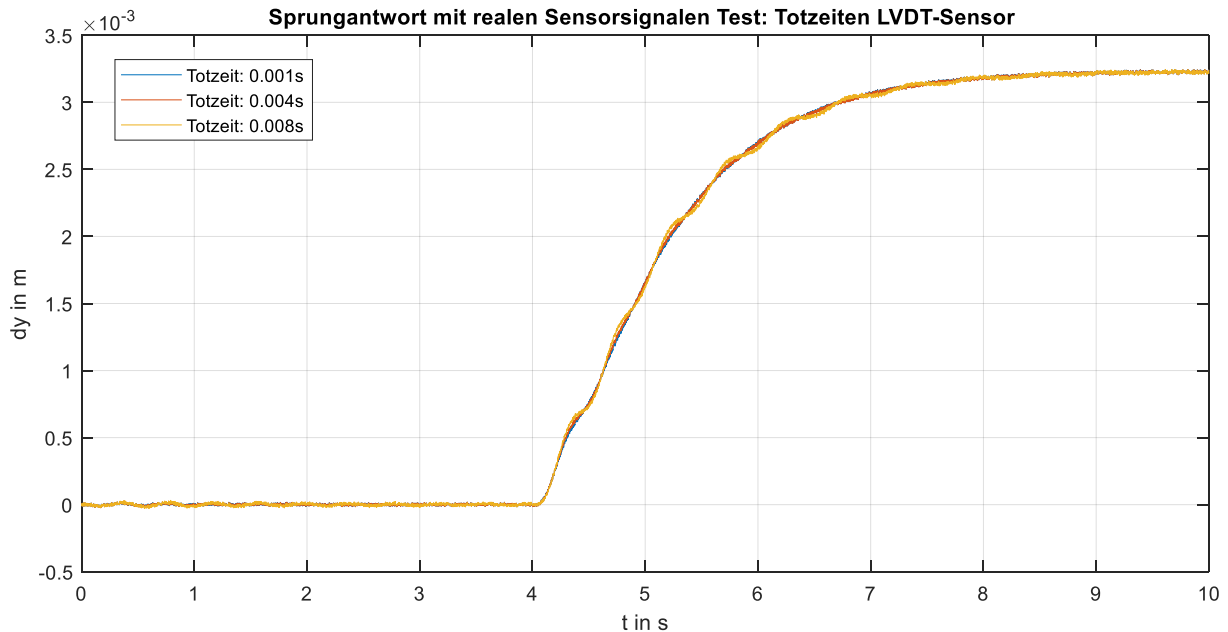


Abbildung 134 laterale Sprungantwort bei verschiedenen Totzeiten in den LVDT-Sensormodellen

Abbildung 134 veranschaulicht die Verschlechterung der Regelgüte bei höherer Totzeit. Durch eine höhere Totzeit in der Messung von der lateralen Position und dem Gier-Winkel, kommt es zu einer Veränderung des dynamischen Verhaltens im Gesamtsystem. Dies macht sich in einem Schwingen der Regelgröße bemerkbar, wie Abbildung 134 darstellt. Bei einer Totzeit von 0.001s und 0.004s ist noch keine signifikante Veränderung zu beobachten, während eine Totzeit von 0.008s bereits eine geringe Welligkeit verursacht.

Spiel im LVDT-Sensor:

Ein weiterer Störfaktor, welcher die Systemdynamik verändert, ist das mechanische Spiel im LVDT-Sensormodell. Folgender Plot veranschaulicht das Regelverhalten des Lateralreglers bei verschiedenen Spielen:

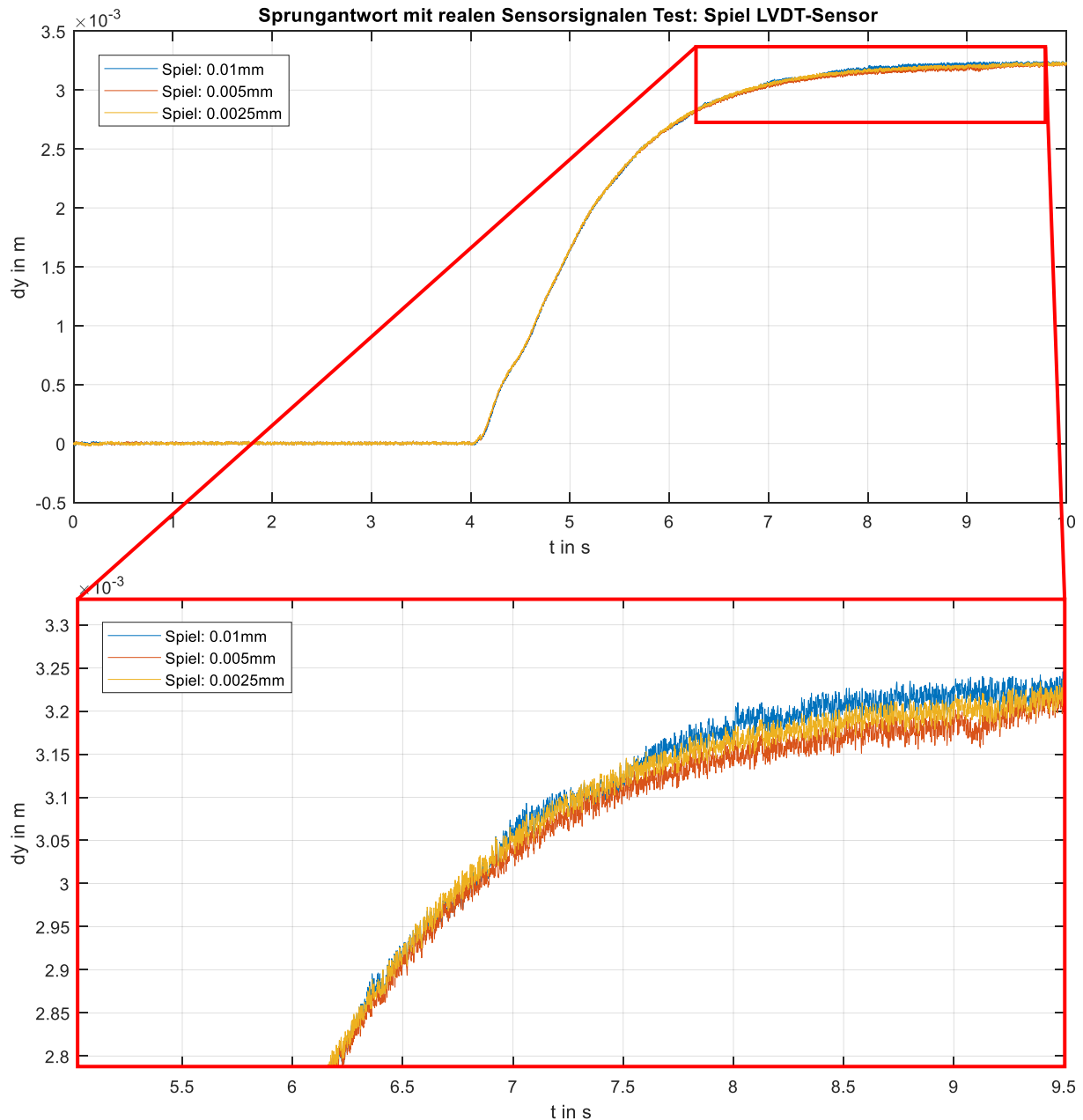


Abbildung 135 laterale Sprungantwort bei verschiedenen Spielen in den LVDT-Sensormodellen

Durch die Veränderung der Dynamik im System, verursacht durch das Spiel, sind auch verschiedene Signalverläufe der Regelgröße dy zu erkennen. Auch der stationäre Endwert variiert leicht mit der Höhe des Spiels. Die Auswirkungen auf das Signal von dy , verursacht durch das Spiel, sind geringer als die Auswirkungen, verursacht durch die Totzeit.

4.5.3 Test der Lateralregelung bei verschiedenen Fehlerszenarien

Für die Messung der lateralen Position dy und des Gier-Winkels ψ sind LVDT-Sensoren verantwortlich (siehe 3.11). Fallen ein oder mehrere LVDT-Sensoren aus, wirkt sich dies direkt auf die Bestimmung von dy oder ψ aus.

Im ersten Simulationsexperiment wird einer der beiden LVDT-Sensoren zur Bestimmung von dy für eine halbe Sekunde deaktiviert. Für die Bestimmung von dy wird die Summe aus dy_1 und dy_2 verwendet (siehe Abbildung 100). Als Simulationsszenario dient hier wieder die laterale Sprungantwort.

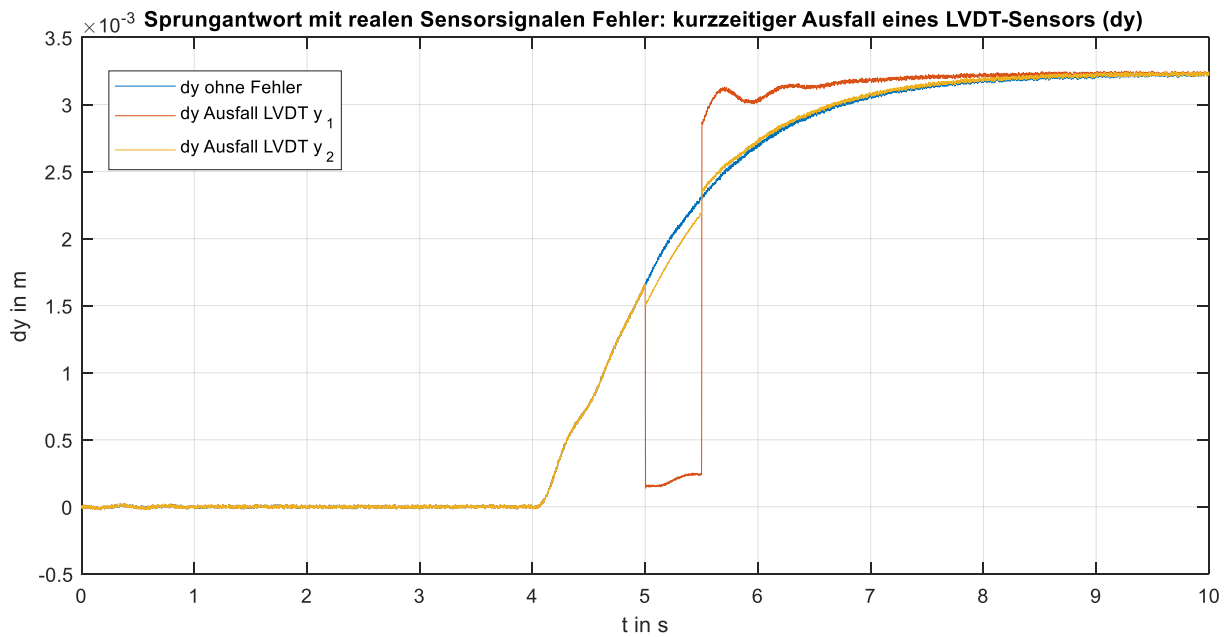
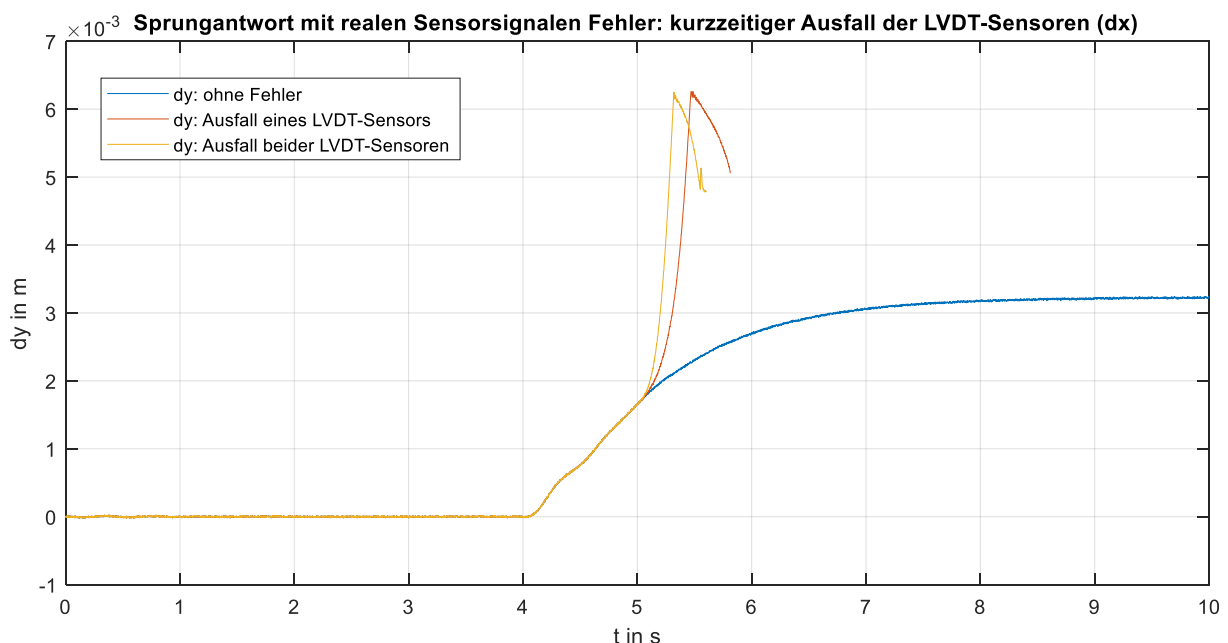


Abbildung 136 laterale Sprungantwort mit Ausfällen der LVDT-Sensoren für die Bestimmung von dy

Fällt der LVDT-Sensor für dy_1 aus, so ist der kurzzeitig erzeugte Messfehler höher als, wenn der LVDT-Sensor für dy_2 ausfällt. Somit reagiert der Regler beim Ausfall vom Signal für dy_1 mit mehr Stellgröße und es ist ein größerer Unterschied des Regelverhaltens zu beobachten.

Als letzte Anwendung der Co-Simulationsumgebung mit Sensorsimulation werden Ausfälle der LVDT-Sensoren, die für die Bestimmung des Gier-Winkels ψ nach Formel 33 verwendet werden, simuliert:



Fällt einer der beiden Sensoren oder alle beide Sensoren zur Bestimmung von ψ aus, kann kein korrekter Wert für den Gier-Winkel berechnet werden. Der Regler erhält entweder einen falschen Wert (bei Ausfall eines Sensors) oder einen Wert von 0° (bei Ausfall beider Sensoren) als Eingang für die Regelgröße ψ . Der Lateralregler fällt somit aus. Ungeregt kommt es bei diesem Szenario zu einem Spurkranzanlauf. Das bedeutet, dass sich die laterale Verschiebung dy bis zum Anschlag des Spurkranzes an die Rolle bewegt. Durch Reibung zwischen Rolle und Spurkranz kommt der Prüfstand

nach etwa 5.5s Simulationszeit zum Stehen. In der realen Anwendung des Fahrwerkes würden die Motoren der Bremskraft, die durch die Reibung entsteht, entgegenwirken und das würde zu einer dauerhaften Reibung und somit zu erhöhtem Verschleiß führen.

4.6 Zusammenfassung und Bewertung der Tests

Die Funktionalität der Co-Simulationsumgebung, bestehend aus der Mehrkörpersimulation in Simpack und der Signalverarbeitung in Simulink mit Sensorsimulation, wurde anhand realistischer Simulationsszenarien untersucht. Die wichtigsten, im Rahmen dieser Arbeit, modellierten Stör- und Fehlereinflüsse der Sensoren wurden dabei mittels realistischer Simulationsszenarien unter Verwendung von realen Parametern aus Sensordatenblättern simuliert und dargestellt.

Die Abweichung des Winkelgeschwindigkeitssignals durch die Unwucht bei dem Encodermodell befindet sich in einem kleinen Wertebereich. Diese würde in der Praxis wegen dem überlagerten Rauschen nicht erkennbar sein. Auch die Zeit- und Wertdiskretisierung durch das Technik-Störmodell stellt für das Interpretieren des Sensorsignals kein Problem dar. Die physikalischen Störungen beim LVDT-Sensor haben unterschiedliche Auswirkungen. Während die Totzeit und das Rauschen keine Relevanz für die Distanzmessung haben, erzeugt das mechanische Spiel eine deutlichere Signalverschlechterung. Diese wirkt sich in der Dynamik des Systems aus. Die Störphänomene technischer Natur, wie Restwelligkeit und Quantisierung/Digitalisierung sind beim LVDT-Sensormodell ebenfalls sehr gering. Die Temperaturabhängigkeit der Ausgangsspannung weist den höchsten technischen Störanteil auf. Da es sich hierbei um eine systematische Abweichung handelt, kann diese Softwareseitig kompensiert werden.

Anhand der Kräfte am Lenker und an den Sekundärfedern wurden die Sensormodelle zur Kraftmessung untersucht. Die Stör-Phänomene innerhalb der Sensoren, wie Nichtlinearität, Kriechen und Hysterese generieren, wegen ihrer kleinen Ausmaße keine Relevanz in der Kraftmessung (am Lenker). Das Übersprechen der Querkräfte hat auf die Messung der Kräfte in z-Richtung an den Sekundärfedersystemen wenig Einfluss, während die Kräfte in z-Richtung selbst stark übersprechend auf die kleineren Kräfte in x-Richtung wirken.

Die Wertauflösung des Encoders wurde bei verschiedenen Clock-Frequenzen berechnet und die Einsetzbarkeit des Encoders für die Analyse des Schlupfes geprüft. Die Auflösung eines Schlupfes von 0.5% der Geschwindigkeit von 400km/h beträgt mit der höchstmöglichen Clock-Frequenz von 100MHz mit dem verwendeten Encoder gerade so 8%. Für eine genauere Schlupfanalyse muss mit einem Clock-Signal höherer Frequenz aufgelöst werden.

Die Tests am Lateralregler mit realen und idealen Sensorsignalen wiesen bei lateraler Sprungantwort keine großen Unterschiede auf. Fallen die Sensoren für die Bestimmung von dy kurzzeitig aus, kann der Regler das System immer noch stabil regeln. Fällt mindestens einer der LVDT-Sensoren (auch kurzzeitig) aus, die für die Berechnung des Gier-Winkel verwendet werden, hat das einen Ausfall des Reglers und somit einen Spurkranzanlauf zufolge.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das letzte Kapitel fasst die wichtigsten Erkenntnisse zusammen. Abgerundet wird die Abschlussarbeit mit einem Ausblick in die Zukunft, wobei weitere Projektvorschläge genannt werden, die auf diese Arbeit aufbauen können.

5.1 Zusammenfassung

Ziel war es eine Simulationsumgebung zu schaffen, in der sowohl die Mechanik des NGT-FuN Integrationsprüfstands als auch die Signalverarbeitung, Automatisierungstechnik und Sensorik in einer Softwareumgebung simuliert werden können. Dazu sollen auch Störungen und Fehler der Sensortechnologie mit in die Simulationsumgebung modelliert werden, um eine realistische Abbildung des realen Systems zu erhalten. Diese Simulationsumgebung wird vor der Fertigstellung des 1:1 NGT-FuN Prüfstands im Jahr 2021 für die Softwareentwicklung genutzt. Anforderung der Sensorik-Simulation war eine möglichst generische Abdeckung der Sensortechnologien, sodass verschiedene Sensoren, mittels Parameter und Konfigurationen, simuliert werden können. Auch die Modelstruktur sollte modular und übersichtlich strukturiert und erweiterbar sein.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine funktionierende Simulationsumgebung für den NGT-FuN Integrationsprüfstand entwickelt, welche eine Mehrkörpersimulation mit einer signalorientierten Modelliersprache verbindet. Aus der bestehenden 3D-Mehrkörper-Simulationsumgebung der Prüfstandsmechanik in Simpack und einer Vorversion des RCP-Systems mit Spurführung, die in Simulink realisiert worden ist, wurde eine Co-Simulationsumgebung erstellt. Die Berechnungen der mechanischen Zustände finden innerhalb der Mehrkörpersimulation statt und die Signalverarbeitungselemente sind in Simulink implementiert. Eine Sensorik-Schnittstelle in Simulink wandelt die physikalischen Messsignale, welche in der Mehrkörpersimulation berechnet werden, in realistische technische Signale um, die auch im späteren realen Prüfstand so erzeugt werden würden. Diese Sensormodelle sind in Teilmodelle aufgeteilt. Ein Physikmodell deckt die physikalischen und ein Technikmodell die technischen Sensorvorgänge, Stör- und Fehlerphänomene ab. Auf diese Weise ist eine Übersichtlichkeit gegeben, die auch im Simulink-Programmcode ersichtlich ist. Der Aufbau der Co-Simulationsumgebung und der Sensormodelle für Encoder-, LVDT-, Laser-, Kraft- und Momentsensor wurden im Methodik-Teil der Arbeit (Kapitel 3) beschrieben. Anschließend wurden realistische Simulationsszenarien anhand der Co-Simulationsumgebung und den Sensormodellen abgeleitet. Parameter aus Datenblättern von Sensoren, welche auch im NGT-FuN Integrationsprüfstand verwendet werden sollen, sorgen für realistische Modelle realer Sensoren. Auf Basis der Simulationsszenarien wurden die Funktionen der Sensormodelle mittels Simulationsexperimente untersucht. Das Simulationsszenario bei lateraler Sprungantwort diente zur Veranschaulichung der physikalischen und technischen Stör- und Fehlerphänomene, welche für den Encoder und den LVDT-Sensor implementiert worden sind. Die physikalischen Störeffekte des implementierten Kraft-Sensormodells wurden ebenfalls anhand der lateralen Sprungantwort untersucht. Untersuchungen des Übersprechens der Querkräfte am Kraftsensor an der Sekundärfederung zeigten die Abhängigkeit des Übersprechens der Querkräfte von der Höhe der wirkenden Kräfte auf. Die Wertauflösung des für den NGT-FuN Prüfstand konzipierten Encoders wurde anhand der Messung des Schlupfes zwischen Rad und Rolle untersucht und bewertet. Abschließende Simulationen mit der Co-Simulationsumgebung mit Lateralregler verglichen das Regelverhalten bei lateraler Sprungantwort unter Verwendung von stör- und fehlerbehafteten und idealen Sensorsignalen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Co-Simulation aus Simpack und Simulink und speziell die Sensorsimulation zufriedenstellend funktioniert haben. Die implementierten Störungen und Fehler

erzeugten plausible Effekte an den Signalen der Sensormodelle. Diese Tests haben die Auswirkungen der einzelnen Störungen und Fehler visualisiert und es konnten Informationen gewonnen werden, welche Phänomene mehr und welche weniger Auswirkungen auf die Güte der Sensorsignale haben.

Während die Einflüsse des Messrauschens, der Digitalisierung und der Nichtlinearitäten beim Encoder und LVDT-Sensor kaum zu erkennen waren, hatten die Temperatur und das Spiel beim LVDT-Sensor und das Übersprechen der Kräfte in den Kraftmessdosen einen sichtbaren, aber dennoch kleinen Effekt auf die Simulationsergebnisse.

Einige Näherungen und Annahmen mussten in der Sensor-Modellbildung gemacht werden, wie bei der Modellierung von Nichtlinearitäten sowie das Kriech- und Hystereseverhalten der LVDT- und Kraft- bzw. Momentsensoren. Doch genau diese Phänomene hatten den geringsten Einfluss auf die Signalgüte. Die Simulationsabweichung, verursacht durch diese Approximationen, ist somit zu vernachlässigen.

Außerdem konnte festgestellt werden, dass für eine genaue Untersuchung des Schlupfes zwischen Rad und Rolle/Schiene das aktuelle Drehzahlsensor-Konzept noch verbesserungswürdig ist, da die Auflösung zu gering ist, um genaue Analysen kleiner Rad-Rolle-Schlüpfen zu ermöglichen.

Für die Simulation der lateralen Sprungantwort unter Verwendung der realen Sensorsignale aus der Sensorsimulation konnte keine signifikante Verschlechterung der Regelgüte gegenüber der Simulation ohne Sensorsimulation festgestellt werden. Lediglich bei Ausfällen der LVDT-Sensoren für die Messung des Gier-Winkels verliert der Lateralregler seine Funktion und es kommt zu einem Spurkranzanlauf.

5.2 Ausblick

Die in dieser Masterarbeit entwickelte Simulationsumgebung kann für weitere Arbeiten an der Forschungsinfrastruktur NGT-Fahrwerk verwendet werden. Gerade für die Implementierungsphase und Aufbauphase im Projektablauf ist ein konsistentes Simulationsmodell sehr nützlich. Weitere Projekte können auf dieser Arbeit aufbauend eröffnet werden. Zum einen hat sich, durch die Modellierung der Sensoren, die Regelstrecke für den Lateralregler leicht verändert, was bedeutet, dass die Regelparameter nicht mehr optimal für das neue System ausgelegt sind. In einem Regelparameteroptimierungsverfahren könnten die Parameter dem neuen System angepasst werden. Die Co-Simulationsumgebung mit den implementierten Stör- und Fehlerphänomenen in den Sensormodellen kann auch für eine Robustheitsanalyse für den Lateralregler genutzt werden. So können beispielsweise verschiedene Störeinflüsse und Fehler simuliert werden. Die Regelgüte kann dabei als Indikator dafür genutzt werden, wie robust der Regler auf gewisse Sensorstörungen ist. Es kann ebenfalls untersucht werden, wie schnell und robust der Regler auf kurz- und langzeitige Fehlerszenarien in der Sensorik reagiert.

Auch ein tieferer Detailgrad in der Sensorsimulation kann dank der strukturierten Modellstruktur, durch Erweitern der Sensormodelle, realisiert werden. Zum Beispiel können die nichtlinearen Effekte vom LVDT- und Kraft/Momentsensor, welche in dieser Arbeit nur approximiert worden sind, näher an der Realität orientiert abgebildet werden. Der Lasersensor wurde in der Sensorik-Schnittstelle in dieser Arbeit nur grob modelliert. Das Laser-Sensormodell kann in einem weiteren Projekt in seiner Physik und seiner Technik detaillierter umfasst werden.

In dieser Arbeit wurde der Fokus zum größten Teil auf die Sensorsimulation gesetzt. Die Aktorik, welche die beiden Motoren an den Rädern darstellen, wurden nicht modelliert. In einer weiteren Projektarbeit könnte auch dies realisiert werden. Dafür kann ebenfalls die generische Modellstruktur mit Trennung von Physik, Technik, Störung und Fehler verwendet werden.

6 Referenzen

6.1 Literatur

- [1] „Schneller als der Transrapid: Japanische Magnetschwebbahn stellt Rekord auf“, *Göttinger Tagesblatt*, 21. Apr. 2015, 2015. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.goettinger-tagesblatt.de/Nachrichten/Panorama/Japanische-Magnetschwebbahn-stellt-neuen-Geschwindigkeitsrekord-auf>. Zugriff am: 30. Juni 2020.
- [2] M. Janson. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/infografik/18952/treibhausgasemissionen-nach-verkehrsmitteln/>.
- [3] Stüber Jürgen, „In den Zügen der Zukunft mit Tempo 400 um die Welt“, *Gründerszene*, 2018.
- [4] S. Keller, *Verkehr aktuell (05.2020)*. [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Transport-Verkehr/Publikationen/Downloads-Querschnitt/verkehr-aktuell-pdf-2080110.pdf?__blob=publicationFile.
- [5] W. Statistisches Bundesamt und F. Kraftfahrt-Bundesamt, *Bahn, KLV und ausländische Lkw: Anteile an der Gesamttransportleistung in Deutschland 2014: Berechnungen des BGL*. [Online]. Verfügbar unter: http://www.bgl-ev.de/web/medien/daten_und_fakten/verkehrsleistungen.htm. Zugriff am: 30. Juni 2020.
- [6] C. Kille, P. Klaus und Schwemmer, *TOP 100 in European Transport and Logistics Services: Market Sizes, Market Segments and Market Leaders in the European Logistics Industry*. DVV Media Group Deutsch Verkehrs-Verlag, 2011.
- [7] A. Heigermoser, *Schienenfahrzeuge: Vorlesungsskriptum zur Lehrveranstaltung 310.214 an der TUG*, 2002.
- [8] Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., *DLR-Homepage - RMC: Robotik und Mechatronik Zentrum*. Verfügbar unter: <https://www.dlr.de/rmc/desktopdefault.aspx/tabid-11942/#gallery/28893>. Zugriff am: 6. August 2020.
- [9] J. Winter, „Next Generation Train - Zug der Zukunft“, *Deine Bahn*, S. 12, 2012.
- [10] J. Winter, „Next Generation Train – NGT An Innovative Vehicle Concept for High Speed Rail“, 2014.
- [11] *DLR-Homepage - Verkehr*. [Online]. Verfügbar unter: <https://verkehrsforschung.dlr.de/de/projekte/ngt-hst>.
- [12] J. Winter, „Next Generation Train - Entwicklung eines Hochgeschwindigkeitszuges für die übernächste Generation“, *Der Eisenbahningenieur EI*, 2012.
- [13] R. Malina. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/verkehrsmittel-48898/version-272144>. Zugriff am: 6. August 2020.
- [14] K. Knothe und S. Stichel, *Schienenfahrzeugdynamik*, 1. Aufl. Springer-Verlag, 2003.
- [15] C. Schindler, M. Brandhorst und A. Haigermoser, *Handbuch Schienenfahrzeuge*, 1. Aufl. Hamburg: DVV Media Group GmbH.
- [16] *deacademic.com*. [Online]. Verfügbar unter: <https://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1245366>.
- [17] J. Janicki, H. Reinhard und M. Rüffer, *Schienenfahrzeugtechnik: DB-Fachbuch*, 3. Aufl. Berlin: BfV Bahn-Fachverl.
- [18] G. Köhler, *Konstruktion der Schienenfahrzeuge: WS 06/07 UNI-Hannover*.
- [19] Kurzeck, B. & Valente, L., *A novel mechatronic running gear: concept, simulation and scaled roller rig testing*. Lille, Frankreich.

- [20] D. Krüger, C. Gomes Alves, J. König, J. Winter und H. E. Friedrich, „Next Generation Train Fahrwerk: Ein leichtbauoptimiertes Fahrwerkskonzept für den Hochgeschwindigkeitsverkehr“, *Georg Siemens Verlag*, 2018.
- [21] B. Kurzeck und Kaiser, *Running dynamics concept with mechatronic guidance: Rail Technology Review (RTR)*.
- [22] Renk., „Richtungsweisender Rollen-Prüfstand für Drehgestelle“, *Ingenieur Spiegel Bahntechnik Schiffbautechnik*, 2018.
- [23] A. Buße, *Knorr-Bremse eröffnet zukunftsweisendes Entwicklungszentrum*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.knorr-bremse.com/de/medien/pressebilder/firmenhauptsitz.json>.
- [24] H.-R. Tränkler und L. M. Reindl, *Sensortechnik: Handbuch Für Praxis und Wissenschaft*. Heidelberg: Springer Berlin, 2015.
- [25] M. Oubbati, *Einführung in die Robotik - Sensoren*. Ulm, 2012.
- [26] *waycon.de*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.waycon.de/produkte/encoder-winkelgeber/messprinzip-encoder-drehgeber/>.
- [27] D. S. Nyce, *Linear Position Sensors: Theory and Application*. Hoboken: John Wiley & Sons, Incorporated, 2003.
- [28] *lvdt.de*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lvdt.de/>.
- [29] M. Rahlves und J. Seewig, *Optisches Messen technischer Oberflächen: Messprinzipien und Begriffe*. Beuth Verlag, 2009.
- [30] Stefan Keil, *Dehnungsmessstreifen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2017.
- [31] Arbeitsgemeinschaft für praktische Dehnungsmessung, *Eigenschaften und Anwendungen von Dehnungsmeßstreifen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2013.
- [32] J. Banks, J. Carson und B. Nelson, *Discrete-Event System Simulation*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.
- [33] P. Fritzson, P. Jones und M. Tohen, *Introduction to Modeling and Simulation of Technical and Physical Systems with Modelica*, 1. Aufl. John Wiley & Sons, Incorporated, 2011.
- [34] M. Mühlbauer, *Symulation dynamischer Systeme: Vorlesungsskript SS19 Hochschule München fk04*.
- [35] Dynasim, *Dymola Dynamic Modeling Laboratory: User's Manual*.
- [36] DassaultSystemes, *Dymola Systems Engineering*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.3ds.com/de/>.
- [37] A. Shabana, *Einführung in die Mehrkörpersimulation*, 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH, 2016.
- [38] C. Steinbrink, *Simulation-based Validation of Smart Grids – Status Quo and Future Research Trends: Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*. Springer International Publishing.
- [39] M. Eigner, D. Roubanov und R. Zafirov, *Modellbasierte Virtuelle Produktentwicklung*. Heidelberg: Springer Berlin, 2014.
- [40] D. Lüdicke, *Schienenfahrzeug- und Umgebungssimulation mit absolutem Raum- und Zeitbezug*. Aachen: Shaker Verlag, 2018.
- [41] *te.com*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.te.com/deu-de/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>.

6.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 NGT-FuN Integrationsprüfstand (CAD-Zeichnung)	1
Abbildung 2: Emissionen von Treibhausgasen (CO_2 , CH_4 und NO_2) in Gramm pro Personenkilometer .	4
Abbildung 3: Prozentanteile der Personenkilometer des öffentlichen Personenverkehrs [4]	5
Abbildung 4: Entwicklung des Personenverkehrs auf den Schienen [4, S. 68]	5
Abbildung 5: Verteilung des Güterverkehrs in Millionen Tonnenkilometer in DE [5]	6
Abbildung 6: DLR-Logo [8]	7
Abbildung 7 NGT-Logo.....	7
Abbildung 8 von oben nach unten: NGT-HST, NGT-Link, NGT-CARGO	8
Abbildung 9: Der NGT High Speed Train [11]	8
Abbildung 10: Unterteilung von Verkehrsmitteln (Nachbildung) [7, S. 7]	9
Abbildung 11: (a) Radprofil [16] (b) Koordinatensysteme und Bewegungen von Schienenfahrzeugen [14]	10
Abbildung 12: (a) Drehgestell Y25 (b) Standard Einzelachsfahrwerk [18]	11
Abbildung 13: Charakteristischer Wellenlauf eines Radsatzes [17, S. 35]	12
Abbildung 14 Vereinfachte Darstellung des NGT Fahrwerks	13
Abbildung 15: ATLAS-Prüfstand von Knorr Bremse [23]	14
Abbildung 16 Skizze NGT-FuN mit allen für dieses Projekt relevanten Komponenten [PF: Primärfeder, SF: Sekundärfeder, LD: Lateraldämpfer, LeD: Lenkdämpfer, ZDS: Zug-Druck-Stange]	15
Abbildung 17 Blockschaltbild Sensor	16
Abbildung 18 klassischer closed-loop Regelkreis	16
Abbildung 19: Encoder Prinzip [26]	18
Abbildung 20 Sensorkette Encoder	18
Abbildung 21: Schaltskizze LVDT [27, S. 96]	19
Abbildung 22: Aufbau eines LVDT-Sensors [28]	20
Abbildung 23 Sensor-Kette LVDT	20
Abbildung 24: Prinzip Interferometer [29, S. 27]	21
Abbildung 25: Prinzip Laser-Distanzsensor (Triangulation) (eigene Nachbildung) [29, S. 45]	22
Abbildung 26 Sensorkette Laser-Abstandssensor	23
Abbildung 27 Kraftsensor mit DMS	23
Abbildung 28 Wheatstone-Brücke mit 4 veränderlichen Widerständen (DMS)	24
Abbildung 29 Sensorkette Kraftsensor mit DMS.....	24
Abbildung 30: Signalfluss-Block [34, S. 6].....	26
Abbildung 31: Beispiel eines n.l. Signalflussplans 1. Ordnung [34, S. 9]	26
Abbildung 32: Das V-Modell am Beispiel des NGT-FuN Projekts (eigene Nachbildung) [39]	28
Abbildung 33 Simat-Schnittstelle	30
Abbildung 34 Grober Signalflussplan der Co-Simulation [orange: in Simulink implementiert, Grau: in Simpack implementiert]	31
Abbildung 35 Co-Simulationsumgebung in Simulink	31
Abbildung 36 NGT-FuN Prüfstand (Simpack MKS)	32
Abbildung 37 Überblick der Körper aus dem MKS. Die Doppelpfeile stellen Kraftbeziehungen zwischen den Körpern dar [rote Verbindungen: Gelenke/Lager, schwarze Verbindungen: Kraftelementen. ZDS: Zug-, Druckstange, LD: Lateraldämpfer]	33
Abbildung 38 Skizze Rad-Rolle mit Encoder-Positionen.....	34
Abbildung 39 Sensorpositionen Funktions-Abstandssensoren in x, y und z Richtung (rote Kreise: Messpunkte).....	35
Abbildung 40 Kraft und Distanzmessung an Feder/Dämpfer (rote Kreise: Messpunkte).....	35

Abbildung 41 Laser-Distanzmessung zur Bestimmung des lateralen Versatzes zwischen Rad und Rolle	36
Abbildung 42 Lasersensorkpunkte an Rad und Rolle.....	36
Abbildung 43 Messung der Kraft an einer Zug-Druck-Stange (ZDS) (vom Radträger freigeschnitten) .	37
Abbildung 44 Kraft/Momentmessung an einer Sekundärfeder (vom Fahrwerksrahmen freigeschnitten)	37
Abbildung 45: Struktur eines Sensormodells y: Messgröße, u: technische Sensor-Ausgangsgröße, x: Zwischengröße [40, S. 109]	38
Abbildung 46 Signalflussplan Sensor-Physikmodell y: Messgröße x: Sensorgröße	39
Abbildung 47 Funktionsübersicht Encodermodell	40
Abbildung 48 Signalflussplan Encodermodell	41
Abbildung 49 Physik-Stör-Submodelle	41
Abbildung 50 Implementierung Schlupf.....	42
Abbildung 51 Winkelgeschwindigkeit mit Schlupf (plakative Darstellung).....	43
Abbildung 52 Skizze Unwucht [r_0 : Radius Schlitzscheibe, Δr : Abweichung Mittelpunkt-Drehachse der Schlitzscheibe, $v(t)$: Umfangsgeschwindigkeit am Rand der Schlitzscheibe]	44
Abbildung 53 Signale eines Quadraturencoders	45
Abbildung 54 Technik-Stör-Submodelle.....	45
Abbildung 55 Flussdiagramm Diskretisierung nach ganze n (stak vereinfacht).....	46
Abbildung 56 Flankenzahl n über die Zeit. überschreitet n die 1, wird ein Trigger gesetzt und n wieder auf null zurückgesetzt	47
Abbildung 57 Pulsfrequenz bei einem 1-Kanal-Encoder	47
Abbildung 58 Pulsfrequenz bei einem Quadratur-Encoder (aufsteigende und absteigende Flanken beider Kanäle sind in Verwendung)	48
Abbildung 59 Pulsfrequenz kontinuierlich diskret und mit Verzögerung	48
Abbildung 60 Pulsfrequenz kontinuierlich diskret und mit Verzögerung und Rauschen.....	49
Abbildung 61 Pulsfrequenz f und Clock-Frequenz f_z	49
Abbildung 62 Implementierung Fehlerszenarien.....	50
Abbildung 63 Encodermodell Library-Block	51
Abbildung 64: Prinzip-Schaltbild LVDT-Sensor und Signalverarbeitung mit Signalverläufe (eigene Nachbildung) [27, S. 103]	51
Abbildung 65 Funktionsübersicht LVDT-Sensormodell	52
Abbildung 66 Signalflussplan LVDT-Sensormodell.....	53
Abbildung 67 Spiel-Grenzen bei $\pm \Delta x_{sp}$	54
Abbildung 68 Flussdiagramm Implementierung Spiel	54
Abbildung 69 Eisenkernbewegung x mit Spiel ohne angepasste Grenzen (plakative Darstellung)	55
Abbildung 70 Eisenkernbewegung x mit Spiel mit angepassten Grenzen (plakative Darstellung).....	56
Abbildung 71 Black-Box-Darstellung der Physik im LVST-Sensor	57
Abbildung 72: typische Kennlinie LVDT Sensor [41].....	57
Abbildung 73 Skizze Quadratische Kennlinie	58
Abbildung 74 RMS-Spannung am Sensorausgang mit Nichtlinearitätsanteil (plakative Darstellung) ..	59
Abbildung 75 Phase und Betrag vom gleichgerichteten u_{rms}	60
Abbildung 76 Betrag des RMS-Signals und das DC-Sensor Ausgangssignal	60
Abbildung 77 Sensorausgangssignal u_{dc} mit Restwelligkeit (plakative Darstellung)	61
Abbildung 78 LVDT-Sensor Library-Block	63
Abbildung 79 Digitalisierungsmodell Library-Block.....	63
Abbildung 80 Laser-Distanzsensormodell Funktionsübersicht	64
Abbildung 81 Lasersensor mit 1-D Fotodioden-Array [Δx_{min} : minimale Auflösung von x].....	65
Abbildung 82 Lasersensor Library-Block	66

Abbildung 83 Überblick Kraftsensormodell	66
Abbildung 84 signalflussplan Kraftsensormodell	67
Abbildung 85 Skizze quadratisch approximierte Kennlinienabweichung durch Hysterese	68
Abbildung 86 Signalflussplan Berechnung Abweichung durch Hysterese	69
Abbildung 87 Dehnung E mit und ohne Abweichung durch Hysterese (plakative Darstellung).....	69
Abbildung 88 Skizze Belastungs- und Entlastungskriechen	70
Abbildung 89 Signalflussplan Berechnung Abweichung durch Kriechen [dE_crl(t_last): Letzter Wert der Abweichung von E durch das vorherige Belastungskriechen zum Zeitpunkt des Lastwechsels] ...	71
Abbildung 90 Dehnung E mit und ohne Kriechen (plakative Darstellung)	72
Abbildung 91 Blackbox Sensor-Technikmodell (Kraftsensor)	72
Abbildung 92 Kraft-Sensormodell Library-Block	74
Abbildung 93 Einfügen der Sensormodelle in die Co-Simulation	74
Abbildung 94 Veränderung der gemessenen Distanz d bei Querverschiebung des Objekts [rote Kreise stellen die Marker dar]	75
Abbildung 95 Distanzmessung zwischen 2 Marker M1 und M2 in nur einer Koordinatenachse (Bezug M1)	75
Abbildung 96 Skizze Radlager (Innen- und Außenlager) a und b beschreiben die Abstände der Lager zu dem virtuellen Lager der MKS	76
Abbildung 97 Abschnitt aus Simpack-Modell vom NGT-FuN [rote Markierung: Halter für Primärfedern]	77
Abbildung 98 Messung von γ mit LVDT-Sensor.....	77
Abbildung 99 Ein- und Ausgänge Lateralregler (vereinfacht)	78
Abbildung 100 Bestimmung von Δy aus 2 LVDT-Abstandssensoren	79
Abbildung 101 Gier-Winkel ψ mit Abstandsmessung an den Rändern des Radträgen	80
Abbildung 102 Screenshot Simpack Model-Tree	81
Abbildung 103 Screenshot Ausschnitt Simat-Block mit den idealen physikalischen Sensorsignalen ...	82
Abbildung 104 Screenshot Co-Simulationsumgebung Simulink	82
Abbildung 105 Screenshot Ausschnitt Sensorschnittstelle	83
Abbildung 106 Screenshot Encodermodell	83
Abbildung 107 Fehler-Triggersignal Fehlerszenario 1: Wert: 1, Fehlerszenario 2: Wert: 2	84
Abbildung 108 Simulation laterale Sprungantwort Δy	85
Abbildung 109 Simulation laterale Sprungantwort ψ	86
Abbildung 110 Simulation laterale Sprungantwort T	86
Abbildung 111 Simulation laterale Sprungantwort v	87
Abbildung 112 Aufbau des Simulationsszenarios	88
Abbildung 113 Winkelgeschwindigkeit w bei verschiedenen Unwuchten (Encoder linkes Rad).....	89
Abbildung 114 Winkelgeschwindigkeit w mit Rauschen (Encoder linkes Rad)	90
Abbildung 115 Frequenzsignal f kontinuierlich und diskret (Encoder linkes Rad)	91
Abbildung 116 Frequenzsignal f ideal und fehlerbehaftet (Encoder linkes Rad)	92
Abbildung 117 Eisenkernposition x bei verschiedenen Totzeiten (LVDT-Sensor für dx_links)	93
Abbildung 118 Eisenkernposition x bei verschiedenen Spielen (LVDT-Sensor für dx_links)	94
Abbildung 119 Eisenkernposition x mit Rauschen (LVDT-Sensor für dx_links).....	95
Abbildung 120 Eisenkernposition x ideal und fehlerbehaftet (LVDT-Sensor für dx_links)	95
Abbildung 121 Ausgangsspannung mit Nichtlinearität (LVDT-Sensor für dx_links)	96
Abbildung 122 Ausgangsspannung mit Restwelligkeit (LVDT-Sensor für dx_links)	97
Abbildung 123 Ausgangsspannung bei verschiedenen Temperaturen (LVDT-Sensor für dx_links)	98
Abbildung 124 Ausgangsspannung analog und digital (LVDT-Sensor für dx_links)	99
Abbildung 125 Dehnung mit und ohne physikalische Störungen beim Kraftsensor am Lenker.....	100

Abbildung 126 Dehnungsabweichung durch die physikalischen Störungen beim Kraftsensor am Lenker	101
Abbildung 127 Kraft in x-Richtung (Sekundärfeder rechts hinten)	102
Abbildung 128 Kraft in z-Richtung (Sekundärfeder rechts hinten)	102
Abbildung 129 Ausgangsspannung ideal und fehlerbehaftet (Kraft am Lenker)	103
Abbildung 130 Geschwindigkeiten der Rolle und des linken Rades bei verschiedenen Clock-Frequenzen	104
Abbildung 131 Signal der sinusförmig schlupfbehafteten Geschwindigkeit v aufgelöst mit verschiedenen Clock-Frequenzen	105
Abbildung 132 Simulation der laterale Sprungantwort mit und ohne Sensorsimulation	106
Abbildung 133 Stellmoment bei Simulation der laterale Sprungantwort mit und ohne Sensorsimulation	106
Abbildung 134 laterale Sprungantwort bei verschiedenen Totzeiten in den LVDT-Sensormodellen ..	107
Abbildung 135 laterale Sprungantwort bei verschiedenen Spielen in den LVDT-Sensormodellen	108
Abbildung 136 laterale Sprungantwort mit Ausfällen der LVDT-Sensoren für die Bestimmung von \dot{y}	109

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Indizes der Signale innerhalb der Sensormodell-Struktur	39
Tabelle 2 Simulationsparameter Encodermodell	43
Tabelle 3 Phasenverschiebungen von n bei verschiedenen Flanken	45
Tabelle 4 Verwendung der Flanken bei verschiedenen Auswertoptionen	45
Tabelle 5 Simulationsparameter LVDT-Sensor	55
Tabelle 6: Dynamische Ober- und Untergrenzen für x.....	56
Tabelle 7 Analogien der Signale für die Implementierung des Kraft- und Momentsensors	67
Tabelle 8 globale Simulationsparameter.....	87
Tabelle 9 globale Simulationsparameter.....	88
Tabelle 10 Physik-Fehlerszenarien beim Encoder	92
Tabelle 11 Physik-Fehlerszenarien beim LVDT-Sensor	96
Tabelle 12 Physik-Fehlerszenarien beim Kraftsensor.....	103
Tabelle 13 Auflösungen des Encoders bei verschiedenen Clock-Frequenzen	104

6.4 Formelverzeichnis

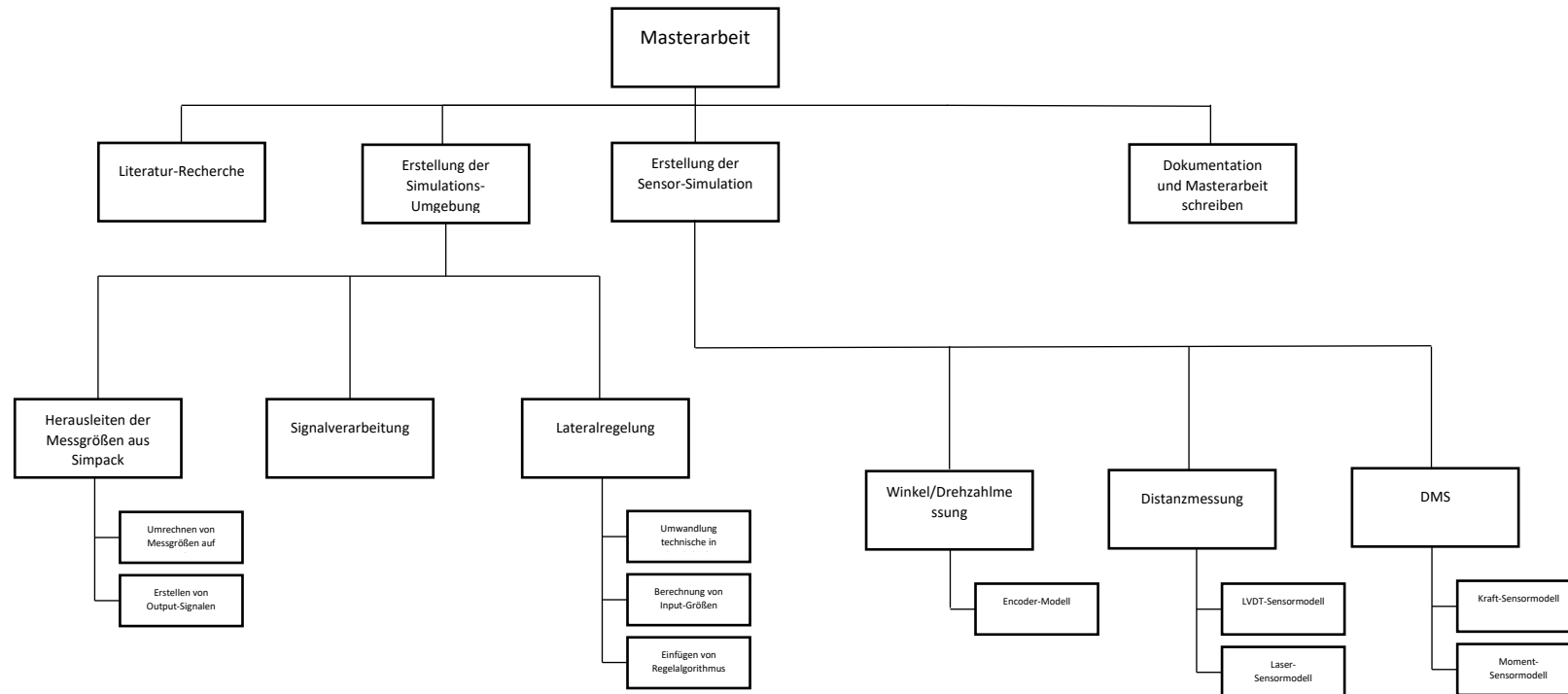
Formel 1 Berechnung Winkelgeschwindigkeit [ω : Winkelgeschwindigkeit, ϕ : Winkel zwischen 2 Rillen, T: Impulszeit]	18
Formel 2 Berechnung Fahrtgeschwindigkeit [v : Geschwindigkeit, ω : Winkelgeschwindigkeit, r_{wheel} : Radius Rad	18
Formel 3 Berechnung der Distanz d in m aus der Laufzeit [c : Lichtgeschwindigkeit in m/s, Δt : Laufzeit (hin und zurück) in s]	21
Formel 4: Wheatstone'sche Brückenschaltung [u : Ausgangsspannung in V, u_0 : Speisespannung in V, R1-4: DMS Widerstände in Ohm]	24
Formel 5 Umrechnung von Geschwindigkeit des Schienenfahrzeugs in Winkelgeschwindigkeit Rad/Schlitzscheibe [ω : Winkelgeschwindigkeit in rad/s, v : Fahrtgeschwindigkeit Zug, r_{wheel} : Radius Rad in m]	41
Formel 6 Berechnung Radumfangsgeschwindigkeit u_{wheel} in m/s [ω : Winkelgeschwindigkeit in rad/s, r_{wheel} : Radradius in m]	42

Formel 7 Berechnung Längsgleitgeschwindigkeit ω [v : Fahrzeuggeschwindigkeit in m/s, u_{wheel} : Radumfanggeschwindigkeit in m/s]	42
Formel 8 Berechnung Schlupf bei Triebfahrt $\Delta\omega_{\text{slip_tf}}$ [ω_{ideal} : Winkelgeschwindigkeit in rad/s (nicht schlupfbehäftet), S_x : Längsschlupf]	42
Formel 9 Berechnung Schlupf bei Bremsfahrt $\Delta\omega_{\text{slip_bf}}$ [ω_{ideal} : Winkelgeschwindigkeit in rad/s (nicht schlupfbehäftet), S_x : Längsschlupf]	42
Formel 10 Berechnung Längsschlupf S_x [S_{const} : Schlupfkonstante, a : Fahrzeugbeschleunigung] ..	42
Formel 11 Umfangsgeschwindigkeit am Rand der Schlitzscheibe bei Unwucht.....	44
Formel 12 Berechnung Abweichung verursacht durch die Unwucht [ω : ideale Drehzahl, $\Delta\omega$: Drehzahlabweichung durch Unwucht].....	44
Formel 13 Umrechnung Winkelgeschwindigkeit in Pulsfrequenz [f : Pulsfrequenz, ω : Winkelgeschwindigkeit, m_z : Zähnezah]	45
Formel 14 Berechnung kleinster Auflösung Δf [f : Pulsfrequenz Encoder, f_z : interne Clock-Frequenz der Encoder-Karte]	50
Formel 15 Quadratische Kennlinie [m : ideale Steigung, Δx_{nl} : Max. n.l. Abweichung, x_{max} : Ende Linearitätsbereich]	58
Formel 16: Offset-Temperaturfehler [Δu : Spannungsfehler in V, tk_0 : Temperaturfehler in %pro10K, U_{max} : Maximalspannung in V, T : Temperatur in K, T_{ref} : Referenztemperatur in K]	62
Formel 17: Steigung-Temperaturfehler [Δu : Spannungsfehler in V, tk_c : Steigungsfehler in %pro10K, U_{max} : Maximalspannung in V, T : Temperatur in K, T_{ref} : Referenztemperatur in K]	62
Formel 18 s-Übertragungsfunktion Bessel-Filter	62
Formel 19 z-Übertragungsfunktion Bessel-Filter (10Hz)	62
Formel 20 Berechnung Quantisierungsstufe [$u_{\text{dig_max}}$: Maximal messbare digitale Spannung, w : Bitbreite A/D-Wandler]	63
Formel 21 lineare Berechnung von der analogen Ausgangsspannung u in V [m_{laser} : Umrechnungsfaktor in V/m, d : Distanz in m]	64
Formel 22 Umrechnung Kraft in Dehnung [E : Dehnung in m, F : Kraft in N, D : Steifigkeit in N/m]	67
Formel 23 quadratische Abweichung durch Hysterese [dF/dt : Ableitung der Kraft, dF/dt_{max} : Maximale Änderungsrate, ΔE_{hys} : maximale Abweichung durch Hysterese, E_{nenn} : Dehnung bei Nennkraft, E_{ideal} : ideale Dehnung (linear zu F)]	68
Formel 24 Formel Belastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s]	70
Formel 25 Formel Belastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s, F : Kraft in N, F_{nenn} : Nennkraft in N].....	70
Formel 26 Formel Entlastungskriechen [ΔE : Abweichung durch Kriechen in m, ΔE_{crl} : max. Fehler durch Kriechen in m, t : Zeit in s, T_{crl} : Zeit bis zur max. Abweichung in s, F : Kraft in N, F_{nenn} : Nennkraft in N].....	71
Formel 27: Abweichung durch Querkraft [ΔE : Abweichung der Dehnung in m, d_{qf} : Querkraft-Einflussfaktor, F_{q} : Querkraft in N].....	72
Formel 28 Umrechnung Dehnung und Spannung [u : Ausgangsspannung in V, E : Dehnung in m, k : k-Faktor in V/m]	73
Formel 29 Berechnung der Lagerkräfte in den Radlagern	76
Formel 30 Berechnung des Messwerts vom LVDT-Sensor zur Bestimmung von den Drehwinkel γ der Primärfeder	77
Formel 31 Expression für einen eliminierten Zustand ω [$out.\omega$: Ausgangsgröße der Drehzahl, ω_{sim} : eliminierte Zustandsgröße]	78
Formel 32 Berechnung der Fahrtgeschwindigkeit v_x [f : Frequenzsignal des Encoders in HZ, m_z : Zähnezah vom Encoder, r_{wheel} : Radius Rad]	79

Formel 33 Berechnung Gier-Winkel ψ in rad aus LVDT-Messwerten	80
--	----

7 Anhang

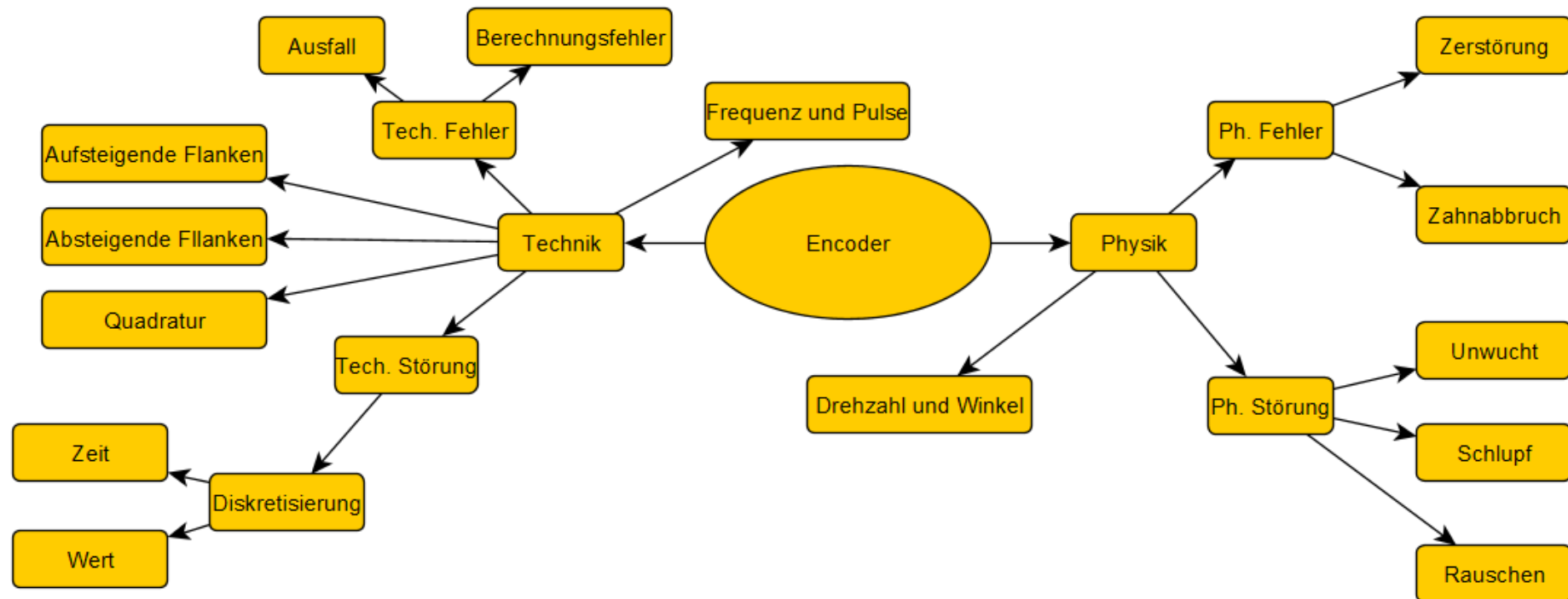
I. Übersicht Tätigkeiten



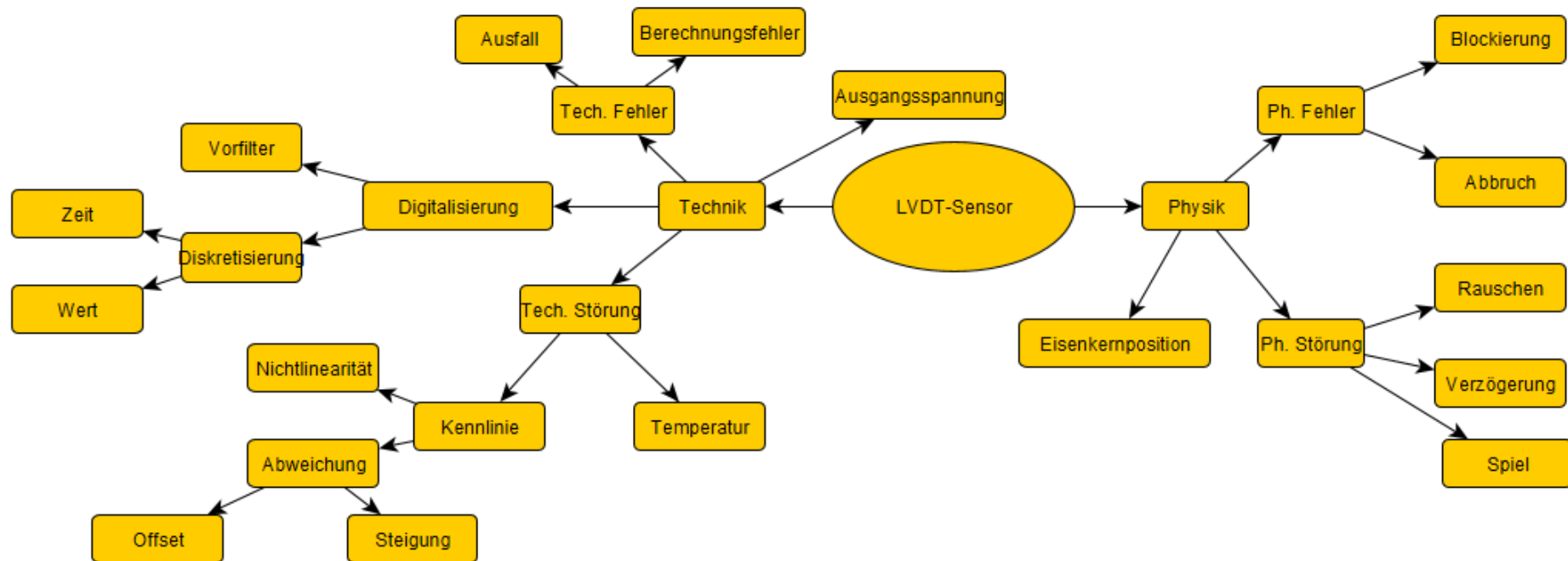
[illegible]

III. Mind-Maps Sensormodelle und ihre zu simulierenden Phänomene

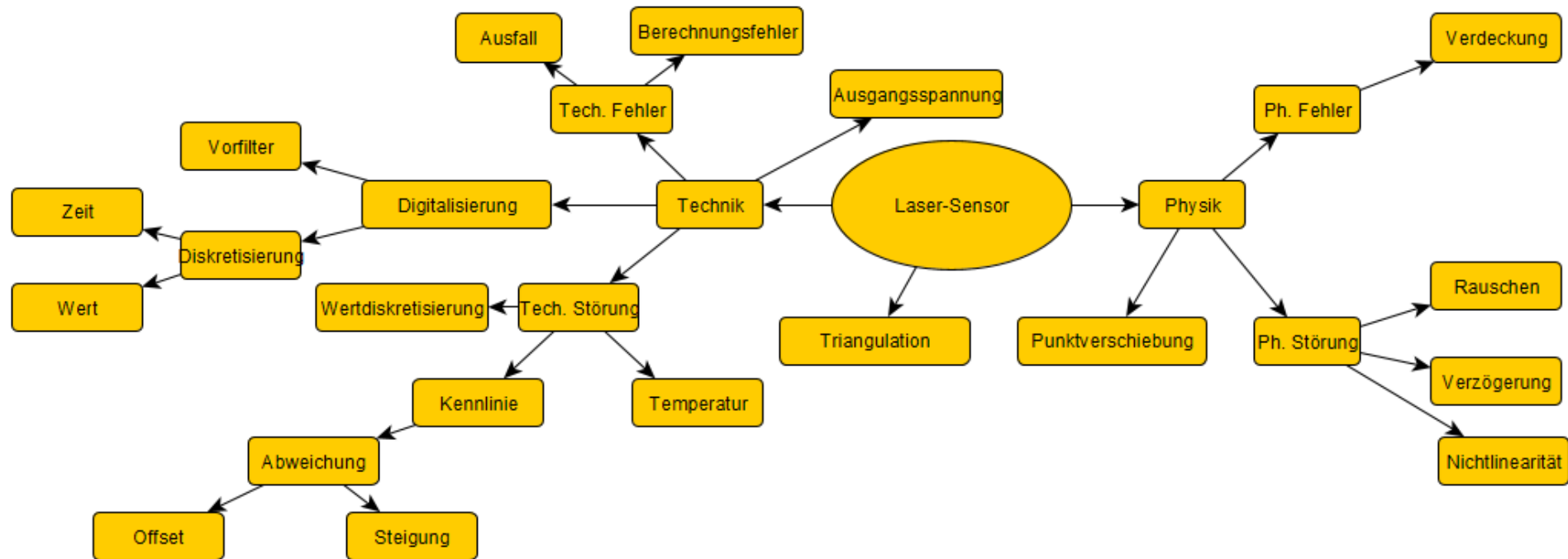
Encoder:



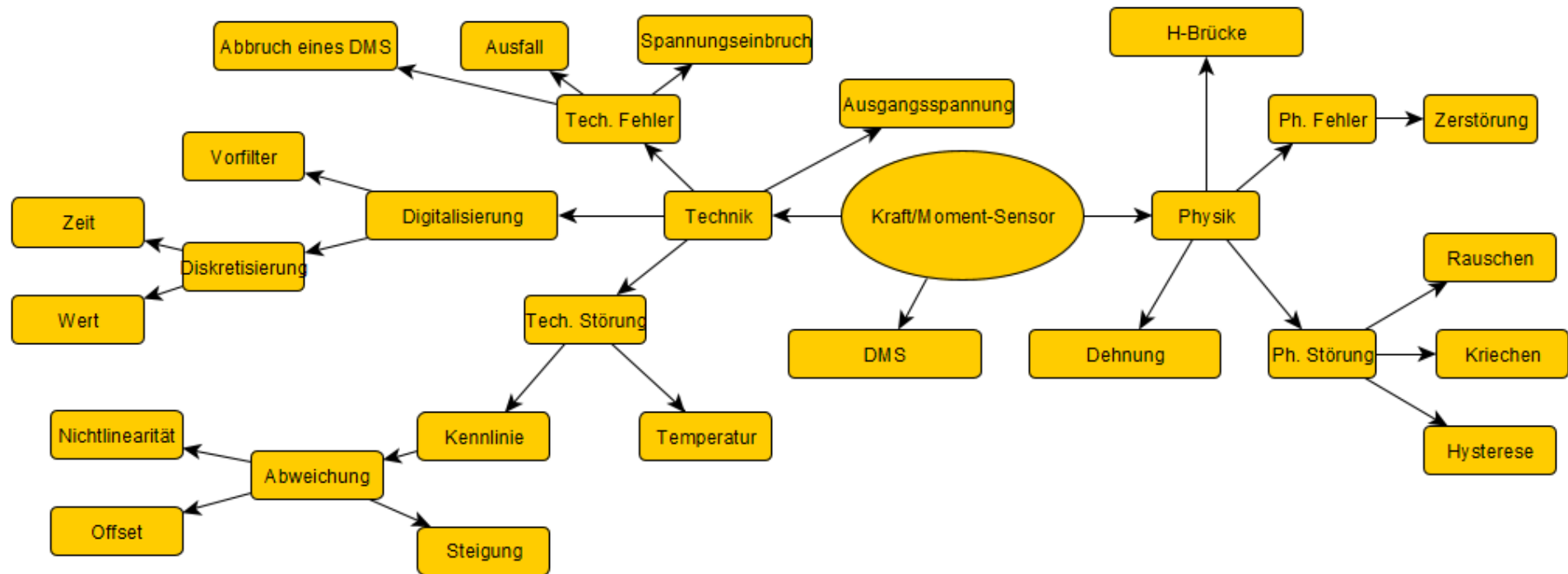
LVDT-Sensor:



Laser-Sensor:



Kraft/Momentsensor:



IV. Die verwendeten Sensoren und ihre Parameter

Encoder Rolle:

Modell	Zähnezahl	Typ	Clock-Frequenz	Duty-Cicle
BaumerMHGP200	1024	Quadratur	50-100MHz	50%

Encoder Rad:

Modell	Zähnezahl	Radius Schlitzscheibe	Typ	Clock-Frequenz	Duty-Cicle
HeidenhainAK2480	1024	128.75mm	Quadratur	50-100MHz	50%

LVDT-Sensor:

Modell	Messbereich	Faktor	Trägerfrequenz	Abw. durch Nichtlinearität	Temperaturabweichung T _{kc} /T _{c0}
TWK IW 120	±60mm	83V/m	1 kHz	0.25%	0.1%

Laser-Abstandssensor:

Modell	Messbereich	Auflösung	Abw. durch Nichtlinearität	Rate	Temperaturabweichung T _{kc} /T _{c0}
ILD1750-50	50mm	0.763µm	0.08%	500V/m	0.1%

Für die Kraftmessung werden verschiedene Sensoren verwendet. Folgende Sensoren sind für die Messung an den Sekundärfedern zuständig. Es handelt sich um Messdosen, die in allen 3 Raumachsen Kräfte und Momente messen können.

Kraftsensor in z-Richtung:

Modell	Nennkraft	Steifigkeit	k-Faktor	Hysterese bei Nennkraft	Kriechen bei Nennkraft nach 30 min	Abw. durch Nichtlinearität	Tkc/Tc0
HBM MCS10 50kN	15kN	1664MN/m	249600V/m	0.1%	0.15%	0.05%	0.1%

Kraftsensor in x- und y-Richtung:

Modell	Nennkraft	Steifigkeit	k-Faktor	Hysterese bei Nennkraft	Kriechen bei Nennkraft nach 30 min	Abw. durch Nichtlinearität	Tkc/Tc0
HBM MCS10 50kN	10kN	13300N/m	151500V/m	0.1%	0.15%	0.05%	0.1%

Momentsensor in z-Richtung:

Modell	Nennmoment	Torsionssteifigkeit	k-Faktor	Hysterese bei Nennkraft	Kriechen bei Nennkraft nach 30 min	Abw. durch Nichtlinearität	Tkc/Tc0
HBM MCS10 50kN	500Nm	7600Nm/°	1.1400V/°	0.1%	0.15%	0.05%	0.1%

Momentsensor in x- und y-Richtung:

Modell	Nennmoment	Torsionssteifigkeit	k-Faktor	Hysterese bei Nennkraft	Kriechen bei Nennkraft nach 30 min	Abw. durch Nichtlinearität	Tkc/Tc0
HBM MCS10 50kN	700Nm	13300Nm/°	9.9750V/°	0.1%	0.15%	0.05%	0.1%

Für die Sensoren, die einen analogen Spannungsausgang haben, wie der LVDT, Laser- und Kraft/Momentsensor, ist auch eine Verstärkerstufe modelliert worden. (siehe Kapitel 3.7.11 bis 3.7.13 Digitalisierungsmodell) Der in dieser Anwendung verwendete Messverstärker ist der QuantumX von HBM mit folgenden Parametern:

Modell	Bitbreite	Eckfrequenz Vorfilter	Bessel-Filterordnung	Abtastzeit
HBM QuantumX	16Bit	10Hz	4	0.001s